

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE DES MINES ET METALLURGIE

ENSMM-annaba-



DÉPARTEMENT SCIENCE ET GÉNIE DES MATÉRIAUX

Mémoire de fin d'études

INGENIEUR

Méthodes de contrôle qualité, application à la fabrication et à la qualification des tubes soudés en matériaux métallique destinés au transport des hydrocarbures

Présenté(e) par : Mr. FODILI Benslim

Encadré(e) par :

- Dr. BOUHOUCHE. Salah (Directeur de Recherche CRTI Chéraga)
- Mr BELAHERACH. Taoufik (doctorant et ingénieur CQ Alfapipe Annaba)

Membres du jury :

- Dr. M.BELHANI (ENSMM-Annaba-)
- Dr. CHIHAOUI (Université –Khenechela)

Président
Rapporteur

Juin 2016

Sommaire

Introduction générale	1
-----------------------------	---

Chapitre I : Généralité sur les Acier HLE

I.1. Généralité sur les aciers	3
I.2. Introduction à l'acier HLE	3
I.2.1 les Acier HLE pour pipe ligne de grade API X70 :	4
I.3 Caractéristiques des Acier HLE pour pipeline :	5
I.3.1. Propriétés mécanique	5
I.3.2. Propriétés métallurgiques	5
I.3.2.1 Composition chimique	5
I.3.3 Influence de la composition chimique [4]	6
I.3.3.1. Influence des éléments formants des précipités	6
I.3.3.2 Influence des éléments de substitution	7
I.4. Mécanismes de durcissements des aciers HLE	9
I .4.1. Solution solide	9
I .4.2. Précipitation	10
I.4.3. Dispersion	10
I.4.4. Affinement du grain	10
I.4.4.1. Affinement du grain γ	10
I.4.4.2. Affinement du grain α	12
I.4.5. Traitements thermiques	12
I.5. Avantage des aciers HLE	12

Chapitre II : Soudage des Aciers HLE

II.1 Introduction	13
II.2. Aptitude au soudage et critère de soudabilité	13
II .2.1. Comment déterminer la soudabilité	13
II .2.2. Influence de la composition chimique sur la Soudabilité	15
II.3. Les défauts de soudure	19
II.3.1. Les principaux défauts de soudure	19

Chapitre III : étude des paramètres de soudage du procédé SAW

III.1. Procédé de soudage sous flux en poudre(SAW).....	25
III.2. Domaine d'application de soudage.....	26
III.3 Avantage du procédé.....	26
III.4. Inconvénients Le soudage sous flux en poudre(SAW).....	26
III.5. Paramètres de soudage et leurs influences.....	26
III.5.1. Influence de l'intensité.....	27
III.5.2. Influence de la tension d'arc.....	27
III.5.3. Influence de la vitesse de soudage.....	27
III.5.4. Influence du diamètre du fil.....	27
III.5.5. Influence de la polarité.....	27
III.5.6. Influence de la longueur libre de fil (stick out).....	28
III.6. Sources de puissance et équipement.....	28
III.6.1. Nature et utilisation des fils.....	28
III.6.2. Flux.....	29
III.6.2.1 Avantage.....	29
III.6.2.2.Inconvénients.....	29
III.6.2.3. Influence de l'épaisseur de la couche du flux.....	30
III.6.2.4. Etuvage des flux.....	30
III.6.2.5. Recyclage de flux.....	30
III.6.2.6. Couple flux/fil.....	30
III.6.2.6.1 Choix du couple fil/flux.....	30
III.7. Spécification API 5L.....	31
III.7.1 Ordre d'exécution pour le soudage automatique sous flux à ALFAPIPE.....	32
III.8. Défauts de soudage rencontré.....	33
III.9. Conclusion.....	34

Chapitre IV : Contrôle qualité

IV. 1. Introduction.....	35
IV.2. Définition de la qualité	35
IV.3. Définition de la qualité	36
IV.3.1. Maitrise de processus	36
IV.3.2. Carte de contrôle	37
IV.4. Examen et contrôle	37
IV.4.1. Contrôle par attribut.....	37

IV.4.1.1. Contrôles visuels.....	37
IV.4.1.2.Epreuve hydrostatique.....	38
IV.4.1.3. Contrôle aux ultrasons automatiques (après test hydrostatique)	38
IV.4.1.4. Contrôle par radiographie.....	40
IV.4.1.5. Contrôles par magnétoscopie.....	41
IV.4.1.5. Contrôle final.....	42
IV.4.2.Contrôle par mesure.....	42
IV.4.2.1. Analyses chimiques.....	43
IV.4.2.1.1. Carbone équivalent.....	43
IV.4.2.2. Essai de traction.....	45
IV.4.2.3. Essai de pliage.....	47
IV.4.2.4. Essai de résilience.....	49
IV.4.2.5. Essai de macro dureté.....	50
IV.5 Analyse de la variabilité et évaluation de la qualité.....	50
IV.5.1. L'évaluation de la qualité.....	50
IV.5.2 .L'audit qualité.....	50
IV.5.3.Analyse de variabilité.....	50
IV.5.4.Analyse de sensibilité.....	52
IV.5.4.1 Spécification et tolérance.....	53
IV.5.4.2 Déclaration de conformité.....	54

Chapitre V : Estimation d'incertitude sur la dureté

V.1. Généralité	56
V.2. Incertitude de mesure.....	57
V.2. 1 Introduction :.....	57
V .2.2. Définition de l'incertitude.....	57
V .2.2.1Vocabulaire et Notions.....	57
V.2.3 Types d'incertitude de mesure.....	58
V.2.3.1 L'incertitude de type A.....	58
V.2.3.2 L'incertitude de type B.....	58
V.2.3.3 Incertitude-type composée.....	59
V.2.3.4 Incertitudes élargies.....	60
V.3.Echantillon et mesure.....	60
V.3.1 Prélèvement de l'échantillon.....	60
V.3.2 Mesure de micro dureté Vickers.....	61

V.3.2.1 Appareillage.....	61
V.3.2.2 Paramètres de mesure.....	62
V.3.2.3 Résultat de mesure.....	62
V.4. Etude de variabilité sur la dureté.....	64
V.4.1 variabilité de macrodureté entre les trois zone de soudage.....	64
V.4.2 variabilité de microdureté Vickers et estimation d'incertitude sur les profil réalisés	65
V.4.2.1 profil 1.....	66
V.4.2.2 profil 2.....	66
V.4.2.3 profil 3.....	67
V.4.2.4 profil 4.....	67
V.5. Relation entre dureté structure.....	70
V.5.1. Microstructure du métal de base.....	71
V.5.2. Microstructure de la zone affecté thermiquement.....	72
V.5.3. Microstructure du métal fondu.....	73
V.6. Conclusion.....	74
Conclusion	75
Références bibliographiques	
Annexes	

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Caractéristiques mécaniques de l’X70 selon l’API 5L.....	5
Tableau I.2 : Composition chimique de l’acier X70.....	6
Tableau III.1 : Paramètres de soudage.....	26
Tableau III.2 : Spécification API 5L.....	31
Tableau II.3 : Ordre d’exécution pour le soudage ALFAPIPE.....	32
Tableau II.4 : Variation de la vitesse et de l’angle	32
Tableau IV.1 : paramètre de contrôle visuel.....	38
Tableau IV.2 : Caractéristique de l’acier.....	40
Tableau IV.3 : Résultat de l’analyse chimique sur 30 échantillons.....	44
Tableau IV.4 : la norme API5L 44 édition.....	45
Tableau IV.5 : résultat de l’essai de traction.....	46
Tableau IV.6 : L’essai de pliage selon la norme API5L.....	48
Tableau IV.7 : L’essai de résilience selon la norme API5L.....	49
Tableau IV.8 : résultats de l’essai de résilience un tube.....	49
Tableaux IV.9 : résultat e l’essai de macro dureté.....	50
Tableau V.1 : résultat de mesure de microdureté sur quatres profils.....	66

Liste des figures

Figure I.1 : Schéma du laminage thermomécanique [3]	5
Figure I.2 : Durcissement en fonction de la taille et de la quantité des précipités [4].....	10
Figure I.3 : Intérêt de la combinaison de deux éléments de microalliage pour le durcissement [4].....	11
Figure II.1 : Dureté sous cordon et fissuration d'un acier microallié (méthode des implants)....	16
Figure II.2 : Influence d'une addition de niobium ou de vanadium sur les propriétés mécaniques des zones affectées par la chaleur (ZAT).....	17
Figure II.3 : Influence du revenu sur les propriétés mécaniques des zones affectées par la chaleur (ZAT).....	18
Figure II.4 : Les différentes zones de soudure	18
Figure II.5 : fissure à chaud	19
Figure II.6 : fissure à froid.....	20
Figure II.7 : soufflures.....	21
Figure II.8 : inclusion de laitier décelée par radiographie.....	22
Figure II.9 : Manque de fusion de la soudure.....	22
Figure II.10 : manque de pénétration.....	23
Figure II.11 : Procédé de soudage sous flux en poudre(SAW).....	25
Figure II.12 : effondrement et excès de pénétration.....	24
Figure II.13 : alignement.....	24
Figure III.1 : Tubes soudés sous flux solide (SAW).....	25
Figure III.2 : zones après soudage	24
Figure IV.1 : Processus de production [8].....	36
Figure IV.2 : <i>CND Ultrason</i>	39
Figure IV.3 : <i>CND Radiographie</i>	40
Figure IV.4 : <i>CND magnétoscopie</i>	41
Figure IV.5 : Eprouvette normalise selon la norme API5L.....	45
Figure IV.6 : Courbe rationnelle de traction sur métal de base et sur cordon de soudure.....	46
Figure IV.7 : Machine d'essais de traction ZWICK/ROELL.....	46

Figure IV.8 : Machine de l'essai de pliage	47
Figure IV.9 : Géométrie et prise de vue de l'éprouvette d'essai de résilience	48
Figure IV.10 : Machine de l'essai de résilience avec l'enceinte thermique.....	48
Figure IV.11 : points de mesures selon API 5L.....	49
Figure IV.12 : Macro duromètre assisté par ordinateur.....	49
Figure IV.13 : Sensibilité de dureté au carbone équivalent.....	53
Figure IV.14 : Famille des 5M appliquée au procès de fabrication des tubes soudés en spiral....	54
Figure V.1 : Empreinte dureté Vikers.....	56
Figure V.2 : Préparation de l'échantillon.....	60
Figure V.3 : Rectification de l'échantillon.....	61
Figure V.4 : Attaque chimique de l'échantillon.....	61
Figure V.5 : Microduromètre modèle 412 D.....	61
Figure V.6 : Variation de dureté entre les zones de soudage	64
Figure V.7 : profil réalisée.....	65
Figure V.8 : Courbe de variation des valeur de microdureté Vickers sur le points de mesure du premier prfil.....	66
Figure V.9 : Courbe de variation des valeur de microdureté Vickers sur le points de mesure du deuxiem prfil.....	66
Figure V.10 : courbe de variation des valeur de microdureté Vickers sur le points de mesure du troisieme prfil.....	67
Figure V.11 : Courbe de variation des valeur de microdureté Vickers sur le points de mesure du quatrieme prfil.....	67
Figure V.12 : Variation des profil de microdureté.....	68
Figure V.13 : écart type de profils	68
Figure V.14 : Macrographie des differents zones du cordon de soudure.....	69
Figure V.15 :Variation moyenne des profils de microdureté Vickers sur le meme échatillon ...	69
Figure V.16 : Microstructure par le microscope optique (X100), Métal de base	71
Figure V.17 : Microstructure par le microscope électronique à balayage, Métal de base.....	71
Figure V.18 : Microstructure par le microscope optique (X100) ZAT	72
Figure V.19 : Microstructure par le microscope électronique à balayage, ZAT.....	72
Figure V.20 : Microstructure par le microscope optique (X100), Métal fondu	73
Figure V.21 : Microstructure par le microscope électronique à balayage, Métal fondu.....	73

Résumé :

Le contrôle qualité est un processus indispensable pour se prononcer sur la qualification des processus depuis la réception de la matière premier jusqu'au produit fini. La nature et le volume des données générées par ce processus nécessitent le développement des méthodes de contrôles précises et à faible coût.

Ce sujet est une combinaison entre l'engineering du processus de réalisation et le développement de méthodes de contrôle pour l'optimisation des coûts de contrôle-mesure.

Mots clé : Qualité, acier HLE, soudage, ZAT, Dureté, méthodes des 5M, incertitude.

Abstract:

Quality control is an essential feature in the qualification of products all along the production process--from beginning to end. The nature and volume of data generated by this process require the development of affordable methods for precise and accurate control.

This topic is a combination of the engineering of the implementation process and the development of control methods for the optimization of cost control measures.

Keywords: Quality, strength steel, welding, ZAT , Hardness, methods of 5M , uncertainty.

Introduction générale :

Depuis plusieurs années, le contexte de mondialisation et l'accroissement de la concurrence ont défini un nouvel ordre économique et industriel pour les entreprises de production de biens. En effet, ces entreprises sont quotidiennement confrontées à la maîtrise et à l'amélioration des performances de l'ensemble de leurs processus afin de garantir leur pérennité et leur compétitivité [Meunier 2003]. Dans cet environnement, chaque entreprise se doit ainsi d'optimiser la satisfaction de sa clientèle et d'améliorer sa performance globale par une amélioration du triptyque Qualité - Coût - Délai [Senechal 2004]. La qualité a toujours été un objectif important depuis que les hommes fabriquent des objets [Pillet 1993]. Elle est matérialisée par des enchaînements logiques d'activité qui concerne le processus de production, le produit, le client, ... L'organisation de certaines activités permet ainsi de représenter différentes notions de qualité : le management de la qualité, l'amélioration de la qualité, la maîtrise de la qualité, ...

Dans l'industrie pétrolière le transport des hydrocarbures est une partie primordiale du processus global. C'est pourquoi il était nécessaire d'assurer la qualité dans la phase de la fabrication des tubes utilisés pour la fonction de transport.

ALFA PIPE ex ALFATUS est une entreprise publique (EPE Alfapipe SPA) spécialisée dans la fabrication des tubes pour canalisation d'hydrocarbures et hydrauliques. Elle dispose d'un système de contrôle qualité assurant la conformité du produit selon les normes internationales API et ISO 9001-2008. ALFA PIPE a pour rôle de produire des tubes soudés en spirale à partir des bobines de tôles. La gamme de tubes fabriqués varie en diamètre entre 16 pouces (406.4mm), et 52 pouces (1320.8mm). Le tube soudé en spirale est obtenu à partir d'un formage à froid d'une bobine d'acier, conformément aux normes API 5L et NFA 49150. La production des canalisations soudées est soumise à plusieurs exigences. Conformément aux spécifications, les tubes seront fabriqués par soudage automatique à l'arc immergé à partir de feuillards. Le métal devra être de bonne qualité notamment en ce qui concerne sa résistance au vieillissement. La qualité du matériau importé sous forme de bobines est vérifiée dans un laboratoire qualifié [1]. Dans ce travail, on commence par analyser la qualification de l'acier grade API 5L X70, fourni par une société Allemande, puis sa soudabilité réalisée par l'entreprise ALFAPIPE par vérifications et validations numériques d'essais mécaniques

Quand on est en présence de nombres relativement important de données, il est souvent difficile par un simple survol des chiffres de déterminer la manière dont se distribuent les résultats.

Pour qualifier le processus nous allons aborder différentes méthodes de contrôle qualité pour arriver à quantifier la performance et identifier les sources d'erreurs.

Le travail se divisera donc en quarts parties :

La première dans deux chapitres portés sur une étude bibliographique concernant le matériau utilisé dans la fabrication, ces caractéristiques et son aptitude à la soudabilité.

La deuxième visera l'étude des paramètres de soudage.

La troisième partie portera sur le contrôle de processus, par attribut et par mesure :

Une étude sur les différents paramètres aura pour but de relever les enseignements des « bons/défectueux », le nombre de défauts commis par chaque individu et qui aura une incidence sur la qualité du produit, selon la méthode de 5M.

Une cratérisation métallurgique des principaux éléments qualifiant le processus de soudage a été réalisée, une importance particulière a été accordée à l'analyse des relations structure – propriétés.

Pour la quatrième partie nous entamerons une étude statistique sur la variabilité d'une propriété mécanique du matériau après soudage.

Une étude pour l'évaluation des incertitudes avec applications sur la dureté a été introduite suite aux recommandations du laboratoire de métallurgie - métrologie, ce dernier est en phase d'accréditation selon le référentiel ISO CEI 17025. Les exigences en matière de calcul des incertitudes et l'analyse des facteurs d'influence sont fondamentales : Une contribution a été introduite dans ce sens.

I.1. Généralité sur les aciers :

L'acier est un alliage métallique constitué principalement de fer et de carbone (dans des proportions comprises entre 0,02 % et 2 % en masse pour le carbone).

C'est essentiellement la teneur en carbone qui confère à l'alliage les propriétés du métal qu'on appelle « acier ». Il existe d'autres métaux à base de fer qui ne sont pas des aciers comme les fontes et les ferroalliages par exemple.

I.2. Introduction à l'acier HLE (Haut Limite d'Elasticité) :

Ces aciers ont été développés essentiellement sous forme de produits plats pour des différentes industries automobiles, de construction, pétrolier ... etc. [2]. Ils ont :

- Des résistances à la traction allant de 300 à 1100 MPa sans recours à un traitement ultérieur, valeurs nettement supérieures à celles des aciers conventionnelles de même teneur en carbone d'où la qualificative haute ou très haute résistance ;
- Une soudabilité élevée à cause, entre autre, de leurs faibles teneurs en carbone (<0.12%) ;
- Une ductilité élevée et homogène en forte section ;
- Une bonne formabilité à froid ;
- Une température de transition ductile fragile basse et un palier ductile élevé.

Les principales classes sont :

- Les aciers HLE microalliés ou HSLA ;
- Les aciers Ferrito-bainitiques ;
- Les aciers Dual-phase et multi-phases ;
- Les aciers TIRP.

Ces aciers ont été développés, afin d'augmenter les propriétés mécaniques (la limite élastique, en particulier) sans détériorer la soudabilité et la ténacité de l'acier.

Les moyens pour y parvenir sont les suivants :

- le durcissement par affinement du grain.
- le durcissement par précipitation.
- le durcissement par écrouissage

On peut les appeler des aciers micro-alliés (ou à dispersoïdes) à cause de faible addition d'éléments d'alliages dans un acier à faible teneur en carbone et manganèse (<1,5%). Les éléments les plus utilisés sont Nb, Ti, V qui donnent des carbures ou des carbonitrides qui se dissolvent uniquement à haute température (1050 °C pour les carbures de niobium par exemple).

Le rôle de ces carbures est double :

- Limiter la croissance des grains austénitiques.
- Provoque un durcissement structural par leurs fines dispersions dans la ferritique.

I.2.1 les Acier HLE pour pipe ligne de grade API X70 :

Les tubes modernes de transport des hydrocarbures sont produits à partir de bobine obtenue par laminage à chaud contrôlé. Ce procédé consiste à optimiser les conditions de laminage en imposant certains paramètres du procédé de mise en forme et de traitement thermique.

Le laminage est contrôlé dans des domaines de température plus basses, pouvant descendre jusqu'à 700°C. Grâce aux possibilités offertes par le contrôle des conditions de laminage et de refroidissement, il est possible d'affiner la taille des grains d'austénite et de provoquer leur transformation dans des conditions telles que la formation de la structure ferrito-perlitique se fasse à relativement basse température et conduise aux grains les plus fins avec durcissement de la ferrite par précipitation interphase de carbure (et carbonitride) de niobium et vanadium. C'est le laminage thermomécanique, qui a donné naissance à la deuxième génération d'aciers HLE qui présentent, comparée à la première génération :

- Des caractéristiques mécaniques plus élevées à analyse donnée,
- Des compositions chimiques moins chargées à caractéristiques mécaniques données[3].

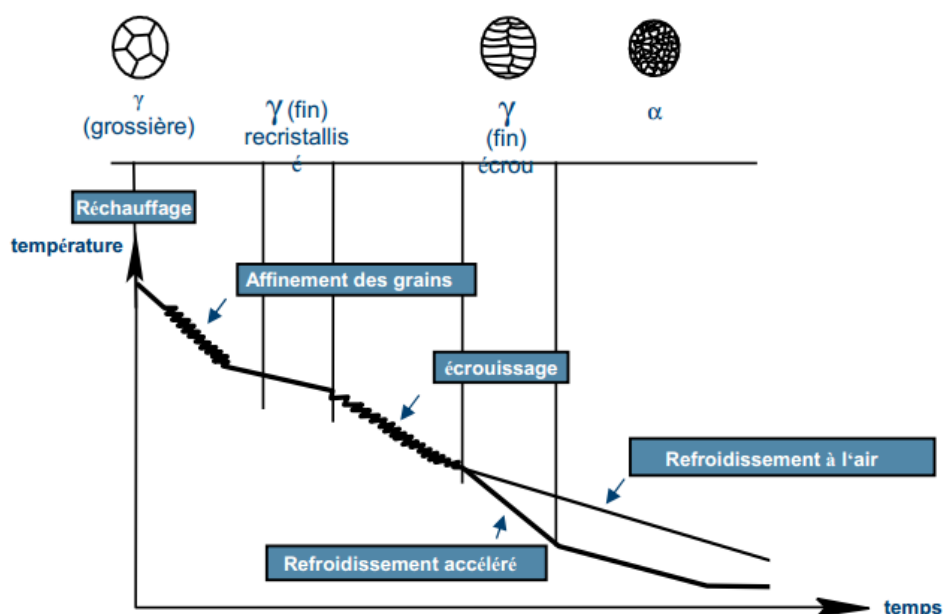


Figure I.1 : Schéma du laminage thermomécanique[3]

I.3. caractéristique des aciers HLE pour pipeline :**I.3.1. Propriétés mécanique :**

Caractéristiques API 5L	Épaisseur (mm)	Re (MPa)	Rm (MPa)	A(%)	Rc/Rm
X70	5-25	485-635	570-760	≥ 22	0.90

Tableau I.1 : Caractéristiques mécanique de l’X70 selon l’API 5L

Avec :

Re : la limite d’élasticité.

Rm : la résistance à la traction.

A% : le pourcentage d’allongement après rupture.

Et :

API : Institut Américain du Pétrole.

5 L : Spécification pour le pipeline.

X : Désignation du grade pour le pipeline de haute résistance.

Le chiffre après le « X » correspond à la valeur de la limite d’élasticité minimale.

I.3.2. Propriétés métallurgiques :**I.3.2.1 Composition chimique :**

Elle est obtenue par l’analyse par spectrométrie (mesure d’onde d’élément)

L’acier X70 contient une faible teneur de carbone (0.085).

La composition chimique est détaillée sur le tableau ci-dessous :

Eléments	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Nb	Ti	V	N	CE _{Pcm}
%max	0.12	0.45	1.70	0.025	0.015	0.30	0.30	0.10	0.25	0.06	0.06	0.10	0.012	0.20

Tableau I.2 : composition chimique de l’acier X70, Selon l’API 5L [1]

- $0.015 \leq Al_{total} \leq 0.050\%$; $B \leq 0.0005\%$; $Ca \leq 0.006\%$; $Sn \leq 0.010\%$; $Al/N \geq 2/1$
- $(Cu + Cr + Ni + Mo) \leq 0.5\%$; $(Nb + V + Ti) \leq 0.15\%$
- Pour toute réduction de 0.01% de C, une augmentation de 0.05% de Mn est permis, jusqu’à une teneur limite de 2%.
- L’équivalent en carbone sera calculé conformément à la formule suivante :

$$CE_{Pcm} = C + Si/30 + (Mn + Cu + Cr)/20 + Mo/15 + Ni/60 + V/10 + 5B \dots [1]$$

I.3.3. Influence de la composition chimique [4] :

Les aciers à haute limite d'élasticité (HLE) de grade X70 API 5L sont des aciers micro alliés au niobium, vanadium, et titane. Les autres éléments principaux entrant dans la composition chimique de ces aciers sont : le Carbone, le Manganèse, l'Aluminium, le Silicium.

Ils sont également communément connus sous le nom des aciers à dispersoïdes relativement aux éléments formant des phases d'insertion stable (Nb, V, Ti). Les principaux constituants structuraux de ces aciers sont : la ferrite, la perlite, et les phases secondaires qui des carbures, des nitrures et des carbonitrures des éléments dispersives.

Les AHL sont généralement laminés à chaud et s'emploient à l'état brut de laminage ou à l'état amélioré pour les constructions soudées et les pipelines. Selon la norme américaine API ils sont classés en plusieurs grades : X52, X60, X70,....

I.3.3.1. Influence des éléments formants des précipités :

a. Le vanadium :

En faible proportion, cet élément augmente la dureté des aciers sans diminuer leur allongement ni leur résilience, c'est un désoxydant énergétique qui améliore la qualité de l'acier. Un teneur en vanadium de 0.5 à 0.7% suffit pour transformer les propriétés d'un acier.

La résistance à la traction et à la fatigue est sensiblement augmentée et l'acier est moins sujet aux tapures de trempe. Cet élément élève la température, pour éviter des plages douces après traitement. Les carbonitrures du vanadium sont mis en solution à une température proche de 1000°C et ne peuvent donc pas empêcher le grossissement du grain austénitique. Leur précipitation a lieu en partie dans l'austénite et en partie en ferrite.

b. Le niobium :

Ce métal résiste à la plupart des aciers, il est ajouté sous forme d'alliages ferreux appelés Ferro-niobium, plus faciles à introduire à la fusion. Il a été révélé qu'en ajoutant dans des aciers à bas taux de carbone une faible proportion (0.1%) de niobium, on élève avantageusement la limite d'élasticité, cette amélioration est due au fait que la métal présente un grain plus fin que l'acier de carbone de même nuance, et que ce résultat a été obtenu, dans des produits laminés beaucoup plus économiquement avec le niobium que tout autre méthode. La résistance de ces produits permet une réduction du poids et une économie de 20 à 30%. Ils sont livrés sous forme des tôles, barres et peuvent être améliorés davantage par traitement thermique et ils présentent une bonne soudabilité.

Il est utilisé pour :

- freiner la recristallisation de l'austénite en solution solide.
- former des précipités lors de la transformation austénite-ferrite.

Cette précipitation a un effet durcissant mais également fragilisant. La présence des carbonitrides (carbures) du niobium non dissout freinent le grossissement du grain austénitique avant écrouissage.

c. Le titane :

Il forme des carbonitrides (carbures), il permet de fixer l'azote. Il se combine avec le soufre en donnant naissance des sulfures non déformés. L'emploi de cet élément demande des précautions car il a tendance à former gros précipités de nitrides qui ne se dissolvent pas, d'où la difficulté d'éviter la fragilisation. Il a un effet durcissant à l'état brut de laminage ; il freine la recristallisation dans l'austénite ou dans la ferrite ; il sert à affiner les grains lors d'une normalisation.

d. L'aluminium :

C'est surtout un désoxydant, le rôle du nitride d'aluminium, qui inhibe le grossissement du grain austénitique, est bien connu. L'aluminium comme le chrome, augmente la résistance à l'oxydation des aciers, il peut intervenir dans certains processus de durcissement (effet durcissant).

I.3.3.2. Influence des éléments de substitution :

a. Le manganèse :

En raison de ces propriétés, le manganèse se trouve, en plus au moins grande qualité, dans presque tous les aciers, il joue un rôle déterminant lors de l'élaboration de l'acier. Il participe à la désoxydation, réagit avec le soufre (donc désulfurant), évitant ainsi la fissuration à chaud, pendant la fusion de l'acier, il absorbe les gaz, détruit les oxydes se trouvent dans le bain en fusion en forte dose et contribue ainsi à la formation d'un métal dense et sans soufflures et régissant l'état inclusionnaire du métal. Il intervient sous multiples formes :

- Il abaisse la teneur en carbone à l'eutectoïde.
- Il durcit la ferrite en solution solide et modifie la solubilité du carbone et de l'azote dans cette phase.
- Il empêche la formation des carbures inter granulaires fragilisant.
- Il élargit le domaine de métastabilité de l'austénite et retarde donc le début de la transformation en conditions isothermes aussi bien dans le domaine ferritique que dans le domaine bainitique.
- C'est un élément efficace pour la trempabilité, surtout si on veut éviter un grossissement du grain ou un accroissement du taux d'austénite résiduelle.
- Il a un effet favorable sur la résistance à la rupture.
- Il diminue la susceptibilité au vieillissement après écrouissage car il abaisse les températures auxquelles se produit la transformation.

Dans le cas des aciers à haute limite d'élasticité (acier au Nb, V), sa teneur est de l'ordre de 1.5%, il à fixer le soufre sous forme de MnS insoluble dès la solidification.

b. Le silicium :

Il se rencontre à faible teneur dans les aciers, il est alors utilisé comme désoxydant.

A plus forte teneur, il augmente la résistance à l'oxydation et confère certaines propriétés particulières (perméabilité meilleure). Il durcit l'acier, mais l'empêche de souder. Les aciers contenant le Si et le Mn sont appelés mangano-siliceux, ils ont la faculté de présenter après traitement thermique un taux élevé d'allongement élastique.

Leur résilience est bien meilleure que celle des aciers au carbone, ils supportent une trempe énergétique sans risque d'éclatement moléculaire. L'effet durcissant du silicium en solution solide est aussi fort que celui du manganèse, de plus le silicium augmente la trempabilité que l'on doit contrôler pour améliorer la soudabilité (la teneur limite dans le cas des aciers à dispersoïdes au Nb-V est de l'ordre de 0.3%).

c. Molybdène :

C'est un élément alpha gène qui tend à former des carbures et qui augmente largement la capacité de trempe des aciers. Il repousse vers la droite le domaine perlitique en affectant peu la position du domaine bainitique, le molybdène est donc particulièrement favorable à l'obtention des structures bainitiques. A teneur équivalente, sa contribution est supérieure à celle du chrome.

I.4. Mécanismes de durcissements des aciers HLE

Afin de satisfaire à toutes les exigences liées aux multiples applications de l'acier, celui-ci doit présenter un grand nombre de caractéristiques alliées à un bas prix de revient.

L'emploi d'aciers de construction ayant des caractéristiques améliorées constitue le seul moyen pour alléger les constructions, de même le rendement des machines dépend dans une large mesure de la résistance de leurs éléments les fortement sollicités.

Des améliorations peuvent être apportées aux caractéristiques des différentes façons suivantes :

- Par solution solide.
- Par précipitation.
- Par dispersion.
- Par affinement de grain.
- Par écrouissage.
- Par traitement thermique.

I .4.1. Solution solide :

Quand ils ne réagissent pas avec le métal de base, les atomes d'éléments d'alliage peuvent soit occuper des sites naturels dans le réseau de la matrice (en formant des solutions solides de substitution), soit s'insérer entre ces sites(en formant une solution solide d'insertion). La distorsion du réseau qui en résulte le rend plus dur.

Le durcissement peut aussi être dû du fait que ces atomes de soluté se logent de préférence au voisinage de défauts réticulaires (lacunes et dislocations), dont le mouvement est ainsi ralenti. Il semble une solution solide d'insertion provoque un durcissement plus important qu'une solution solide des substitutions, car elle entraîne des distorsions du réseau plus importantes.

I.4.2. Précipitation :

Il a durcissement par précipitation lorsque les éléments d'alliages réagissent avec le carbone ou l'azote. Les précipités formés s'apposent aux mouvements des dislocations ou tout au moins ralentit ces mouvements.

Ces composés peuvent précipiter de façon cohérente (auquel cas les distorsions du réseau sont importantes et effectuent fortement la résistance et la fragilité) ou de façon non cohérente (auquel cas l'effet est plus faible, en raison de la relaxation des contraintes).

I.4.3. Dispersion :

Lorsque les précipités sont très (de 50 à 500Å) et bien dispersés dans la matrice, ils peuvent provoquer une très importante consolidation. Ce type de précipitation a été appelé dispersion. Ce terme issu de la morphologie des particules a été étendu à des structures qui ne résultent pas d'une réaction de précipitation.

I.4.4. Affinement du grain :

Certains éléments (carbures et nitrures) empêchent tout grossissement des grains pendant le chauffage. Il en résulte une structure à grain fin offrant beaucoup plus d'obstacles au mouvement des dislocations, puisque l'énergie nécessaire pour franchir un joint de grain est plus grande que celle nécessaire pour franchir une particule précipitée. Il faut mentionner ici que l'affinement du grain est le seul mécanisme ayant une influence favorable sur toutes les caractéristiques : limite d'élasticité, résilience...).

I.4.4.1. Affinement du grain γ

La taille du grain γ va être déterminée par l'ensemble des opérations de chauffage, les déformations, les temps entre déformations et la vitesse de refroidissement.

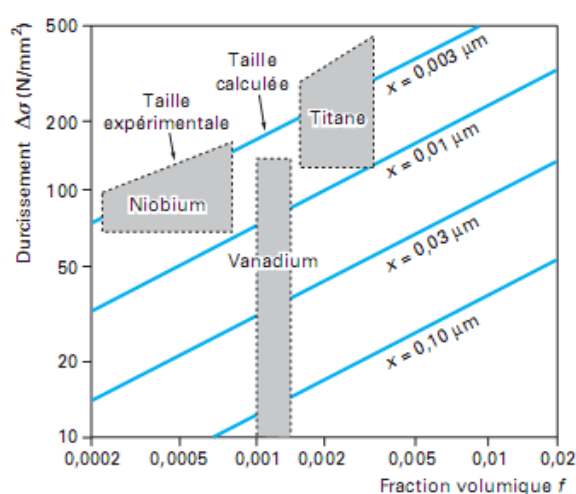


Figure I.2 : Durcissement en fonction de la taille et de la quantité des précipités [4].

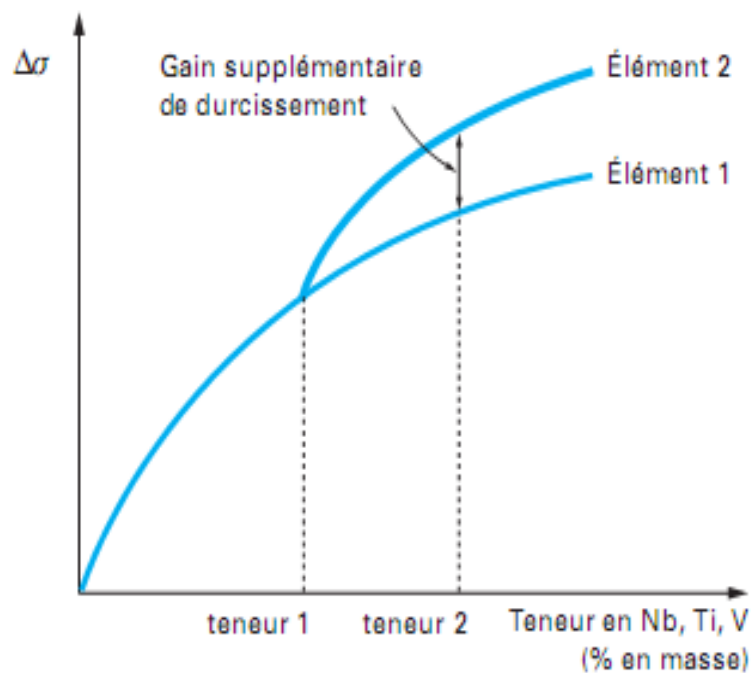


Figure I.3. Intérêt de la combinaison de deux éléments de microalliage pour le durcissement [4].

I.4.4.2. Affinement du grain α

L'influence des précipités sur la taille de grain α va passer d'abord par l'hérédité du grain γ quand il y a changement de phase ; des grains γ fins donneront des grains α fins avec une relation dépendant de la vitesse de refroidissement [4].

I.5. Avantage des aciers HLE :

- Ils combinent soudabilité améliorée due au très faible niveau de carbone et bonne formabilité, leurs caractéristiques mécaniques facilitent le formage sur presses et sur lignes automatisées.
- Ils se caractérisent de plus par une bonne tenue à la fatigue et à la résistance au choc.
- Grâce à leur limite élastique élevée (R_e), ils sont particulièrement adaptés lorsqu'une réduction de poids est recherchée, c'est pourquoi ces aciers s'utilisent fréquemment en remplacement des aciers de construction [article : Europ-Strip Production les aciers à haute limite d'élasticité].

II.1. Introduction :

Le soudage est un moyen d'assemblage permanent. Il a pour objet d'assurer la continuité de la matière à assembler. Dans le cas des métaux, cette continuité est réalisée à l'échelle de l'édifice atomique. En dehors du cas idéal où les forces inter-atomiques et la diffusion assurent lentement le soudage des pièces métalliques mises entièrement en contact suivant des surfaces parfaitement compatibles et exemptes de toute pollution, il est nécessaire de faire intervenir une énergie d'activation pour réaliser rapidement la continuité recherchée.

L'opération peut être appliquée aux métaux ainsi qu'aux thermoplastiques (voir soudage plastique) et au bois (voir soudage du bois). Le soudage permet d'obtenir une continuité de la nature des matériaux assemblés : matériau métallique, matière plastique, etc. De ce fait, les techniques d'assemblage mécaniques (rivetage, boulonnage, agrafage...) ou par adhésion (collage), ainsi que les techniques de brasage ne répondent pas à la définition du soudage.

II .2. Aptitude au soudage et critère de soudabilité :

Les définitions suivantes sont sensiblement équivalentes :

« Un matériau métallique est dit soudable dans une certaine mesure par un processus donné et dans un but donné, lorsqu'une liaison métallique continue peut être obtenue par soudage en utilisant un processus adapté, de manière que les joints satisfassent aux exigences spécifiées du point de vue de leurs propriétés locales et de leur influence sur la construction dont ils font partie ».

« Facilité avec laquelle un matériau peut être soudé pour produire un joint acceptable ».

« Capacité d'un métal à être soudé dans des conditions de fabrication imposées à une structure particulière conçue dans manière adaptée et à produire l'effet souhaité de manière satisfaisante ».

II .2.1. Comment déterminer la soudabilité

Il est impossible de mesurer ou de calculer la soudabilité, en partie en raison des nombreux facteurs qui influent sur la facilité avec laquelle une soudure est pratiquée et sur caractéristiques de la soudure qui en résultent.

Principaux facteurs qui jouent sur la soudabilité :

- *La conception des joints.
- *Les propriétés métallurgiques.
- *Les propriétés physiques.
- *Les propriétés chimiques.

a. Le carbone équivalent de l'acier :

Le carbone équivalent (Ceq) d'un acier (matériau de base ou métal de la soudure) renseigne sur certain aspect de son comportement, notamment en ce qui concerne son aptitude à la trempe et le risque de criquage dû à la présence d'hydrogène. Le Ceq s'exprime en pourcentage.

L'acier à Ceq élevé risque davantage de durcir dans les zones thermiquement affectées des soudures réalisées et est plus sujet au criquage dû à la présence d'hydrogène que l'acier à faible Ceq.

L'aptitude à la rupture joue sur la soudabilité ; c'est pourquoi il est plus difficile de réussir le soudage d'acier à Ceq élevé.

Le Ceq est influencé par les éléments d'alliage de l'acier. Diverses formules permettent de calculer le Ceq, la formule utilisée étant déterminée par le type d'acier et les aspects particuliers et importants du comportement. Le Ceq de l'acier modérément allié, en ce qui concerne son aptitude à la trempe et son risque de criquage dû à l'hydrogène, se calcule souvent grâce à la formule *d'International Institut of Welding (IIW)*.

$$\text{Ceq} = \%C + \%Mn + (\%Cr + \%Mn + \%V)/5 + (\%Cu + \%Ni)/15$$

Le carbone et le manganèse ont l'impact le plus important sur la valeur du Ceq en ce qui concerne les aciers modérément alliés. C'est pourquoi pour des calculs d'ordre général, la formule peut parfois être raccourcie :

Le Ceq pour le tube et les soudures correspondantes est en principe inférieur à 0.4%.

$$\text{CE} = C + Mn/6$$

b. Sensibilité à la fissuration à chaud :

Calcul de l'indice de Hull :

$$I = (Si + 3Nb + 2Ti + 200B + 30Zr + 0.5Cu) - (1/3Mn + 1/2Mo)$$

c. Sensibilité à la fissuration à froid

$$HM(HV5) = 240 + 790\%C$$

d. Sensibilité à la fissuration au réchauffage :

La fissuration au réchauffage a lieu à basse température dans la zone du métal de base affectée par la chaleur (gros grains) ou celle du métal fondu des soudures pendant ou immédiatement de relaxation des contraintes effectuée à la suite d'une opération de soudage.

II .2.2. Influence de la composition chimique sur la Soudabilité :

La soudabilité est une propriété complexe qui dépend beaucoup de la composition chimique de la nuance et, en particulier, de la teneur en carbone qui détermine la dureté de la martensite, qui se forme dans certaines conditions de soudage, et sa sensibilité à la fragilisation par l'hydrogène. Il est donc très intéressant de pouvoir changer les caractéristiques grâce au microalliage, car cela permet d'abaisser la teneur en carbone et dans certains cas aussi les éléments d'alliage qui figurent dans les formules de carbone équivalent caractérisant la trempabilité des aciers en conditions de soudage.

L'effet durcissant des éléments de microalliage est sans commune mesure avec leur faible effet sur la trempabilité des aciers (seul le vanadium figure dans certaines formules de carbone équivalent) : les aciers microalliés ont ainsi pris une grande place dans les aciers soudables. Cet abaissement de la teneur en carbone est très favorable pour la sensibilité à la fissuration à froid, mais aussi pour l'amélioration de la ténacité du métal de base ainsi que des zones affectées. La **Figure II.1** montre ainsi une comparaison entre une nuance classique et une nuance microalliée en utilisant un essai classique de fissuration par l'essai d'implant.

Néanmoins, l'effet durcissant et fragilisant des précipités peut se faire sentir dans les zones qui subissent des cycles thermiques à haute température telles que les zones affectées par la chaleur et le métal fondu. La **Figure II.2** montre ainsi les variations des mesures de ténacité en fonction des teneurs en niobium et vanadium, et des conditions de soudage qui déterminent les cycles thermiques.

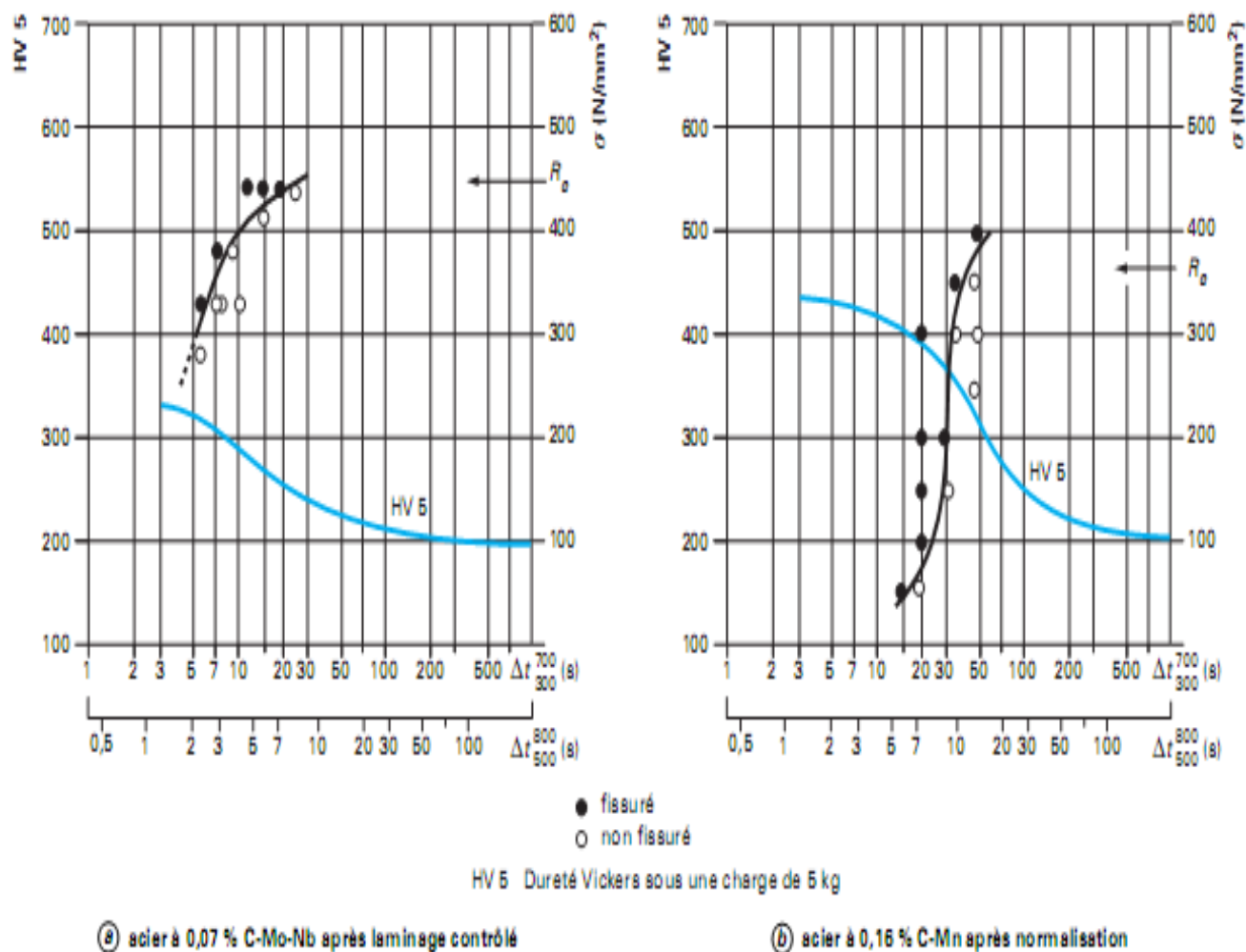


Figure II.1 : Dureté sous cordon et fissuration d'un acier microallié (méthode des implants).

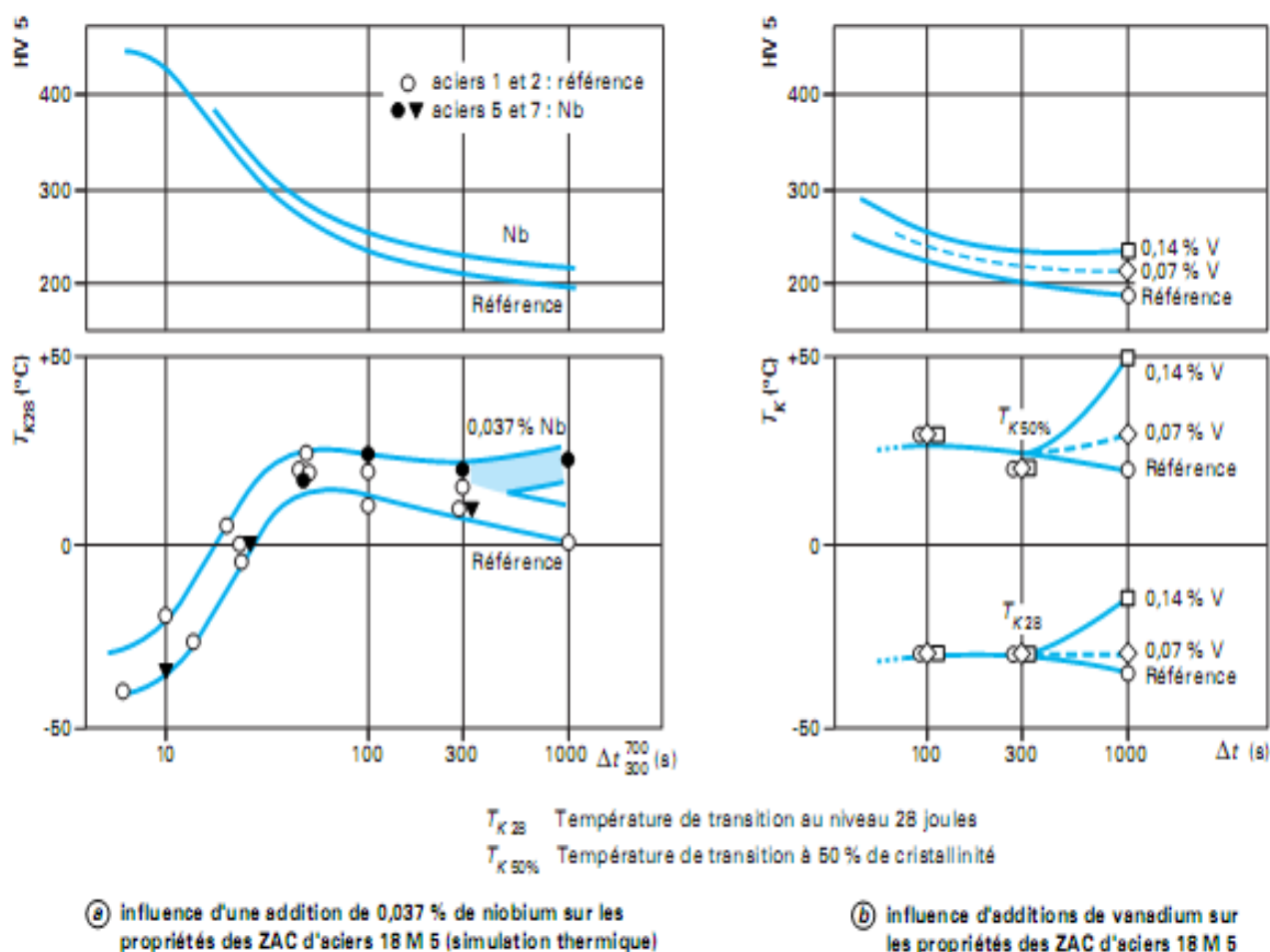


Figure II.2 : Influence d’une addition de niobium ou de vanadium sur les propriétés mécaniques des zones affectées par la chaleur (ZAT).

Dans le métal fondu, la teneur en élément dépend de la dilution avec le métal d’apport, ce qui dépend de l’énergie de soudage ; il se produit ensuite une reprecipitation si la vitesse de refroidissement le permet. La variation de ténacité est encore plus complexe quand il s’agit de soudures multi passes avec superposition de cycles thermiques. Dans ce cas, les températures atteintes à une certaine distance provoquent la précipitation. Des modèles permettent la prévision des durcissements et de là les variations de ténacité.

Enfin, la précipitation peut également se produire au cours de traitements de revenu comme les traitements de relaxation des contraintes (**Figure II.3**).

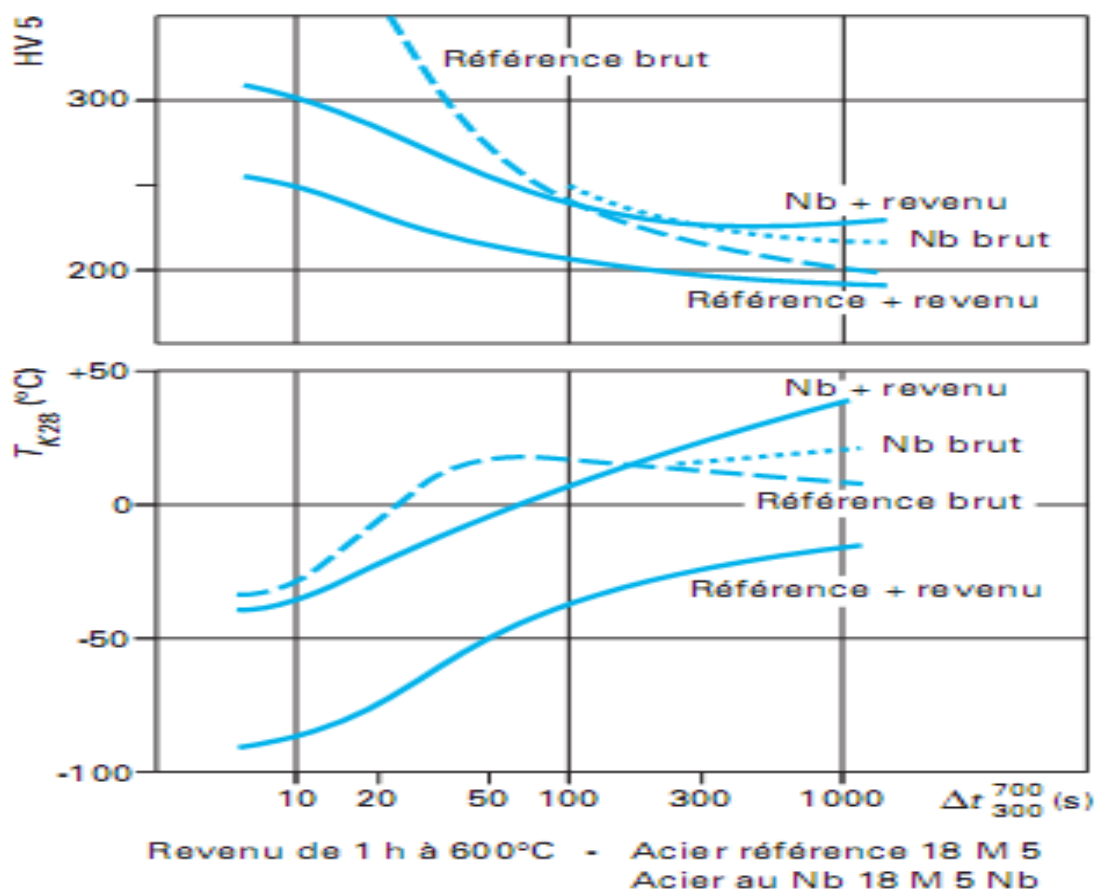


Figure II.3 Influence du revenu sur les propriétés mécaniques des zones affectées par la chaleur (ZAT).

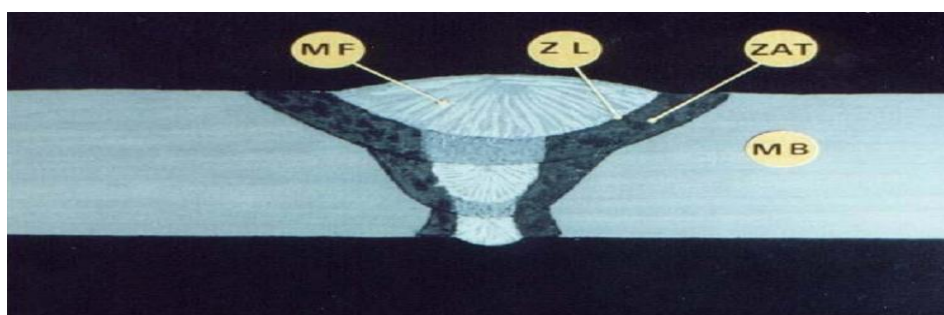


Figure II.4 : Les différentes zones de soudure

MF : métal fondu.

ZL : zone de liaison.

ZAT : zone affectée thermiquement.

MB : métal de base.

II .3. Les défauts de soudure :

Il existe une grande variété de défauts caractérisés par leur nature (solide, gazeuse) leur forme et par leur origine. Lors du contrôle, la distinction entre différents types de défauts se relève décisif car elle permet souvent d'estimer les risques de fracture de matériau. Un « défaut » est une anomalie de la matière risquant de provoquer « la ruine » de l'ensemble soudé. En soudage « un défaut » : discontinuité dans la soudure ou écart par rapport à la géométrie volume.

II .3.1. Les principaux défauts de soudure :

Les fissures :

Les fissures sont des déchirures qui apparaissent au cours du refroidissement sous l'effet de contraintes, ce sont des défauts plans.

Les fissures peuvent avoir des orientations différentes (transversales, longitudinales, ramifiée).

A. Fissures à chaud : ségrégation inter granulaire.

B. Fissures à froid : fragilisation par l'hydrogène.

Fissures à chaud :

Elle est due à la présence de ségrégations. Au moment de la solidification, les impuretés seront rejetées dans l'axe du cordon qui pourra fissurer sous l'effet des contraintes.

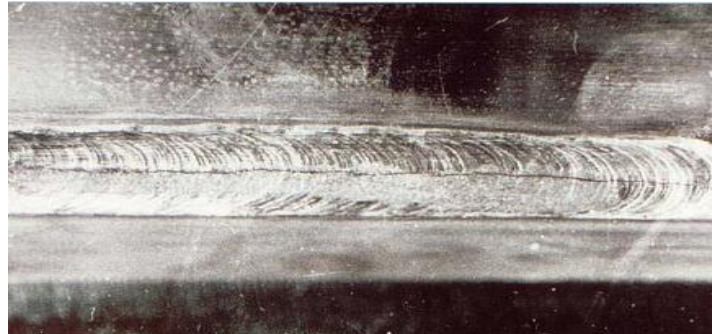


Figure II.5 : fissure à chaud.

Précautions :

- Eviter les joints étroits et profonds.
- Eviter le bridage.
- Modifier la vitesse d'avance.
- Utiliser des matériaux de bonne qualité.

Fissure à froid :

C'est un phénomène dû à la présence combinée de trois facteurs :

- ❖ Hydrogène.
- ❖ Contraintes.

❖ Structure métallurgique sensible (trempe martensitique).

Ce type de fissure peut apparaître vers la fin du refroidissement ($\theta < 250^\circ$) ou de façon différée, plusieurs heures après l'exécution de la soudure.



Figure II.6 : fissure à froid

Fissures longitudinales :

Fissures sensiblement parallèles à l'axe de la soudure.

Elle peut se situer :

- Dans le métal fondu.
- Dans la zone de la liaison.
- Dans la zone thermiquement affectée.
- Dans le matériau de base.

Fissure transversale :

Fissure sensiblement transversale à l'axe de la soudure.

Elle peut se situer :

- Dans le métal fondu.
- Dans la zone thermiquement affectée.
- Dans le matériau de base.

Fissure de cratère :

Fissure située dans un cratère de fin de cordon et qui peut être :

- a) Longitudinale.
- b) Transversale.
- c) Rayonnante.

Les cavités :

Ce sont des défauts volumiques, elles comprennent :

- *les retassures (retrait du métal) qui apparaît souvent les cratères.
- *les soufflures qui sont des bulles de gaz réparties ou isolées et de formes diverses.
- *les inclusions (laitier).

Soufflures :

Les soufflures sont des inclusions de gaz à l'intérieur du métal fondu. Elles peuvent être dues à diverses causes :

- Lors d'un arrêt en pleine soudure, il se forme en général une retassure au centre du dernier bain de fusion.
- Les gaz emprisonnés peuvent être produits par des réactions chimiques qui naissent au sein du métal en fusion dans certains cas, ces réactions sont assez rapides pour que les gaz se dégagent en bouillonnant au cours du soudage.

Ce phénomène, qui porte le nom de (ROCHAGE) conduit à des soudures ayant l'aspect d'une mousse métallique. Des soufflures peuvent être mises en évidence par des examens radiographiques.

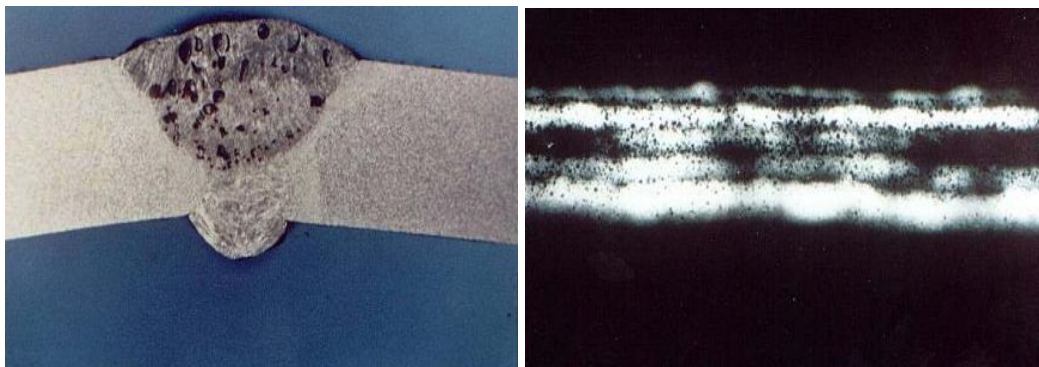


Figure II.7 : soufflures

Inclusion de laitier :

En soudure le laitier provient de la fusion des éléments non métalliques de l'enrobage, celui-ci était moins dense que le métal fondu, doit normalement flotter à la surface.

Lorsque reste inclus dans le cordon, cela peut provenir :

- Chanfreins trop étroits.
- Mauvaise décrassage entre passes.
- Choix de l'électrode.
- Mauvaise intensité.

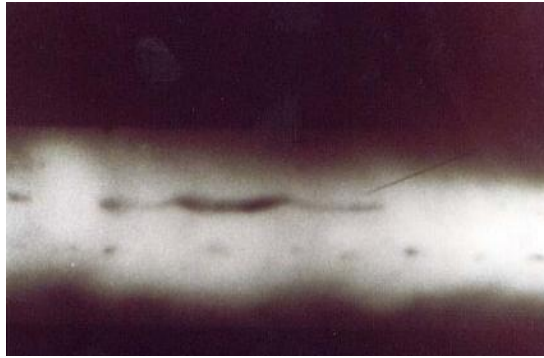


Figure II.8 : inclusion de laitier décelée par radiographie.

Manque de fusion :

C'est un manque de liaison entre le métal de base et le métal déposé, il constitue une entaille aigue susceptible de jouer le rôle d'amorce pour une fissure de fatigue.

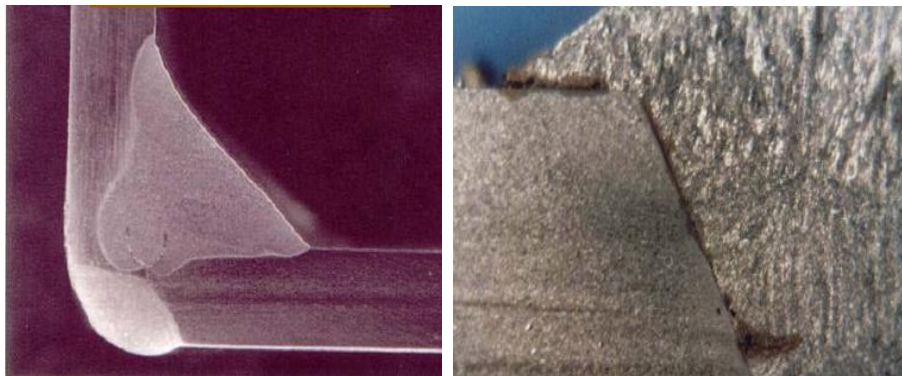


Figure II.9 : Manque de fusion de la soudure

Causes possibles :

- Mauvaise tenue de l'électrode.
- Intensité trop faible.
- Electrode de diamètre trop faible.
- Vitesse d'avance élevée.
- Mauvaise préparation.

Manque de pénétration :

On dit qu'il y a un manque de pénétration lorsque la soudure ne traverse pas complètement les tôles de part en part. Ce défaut est le plus courant et aussi le plus grave parce qu'il diminue fortement la résistance du joint en créant une amorce de rupture.

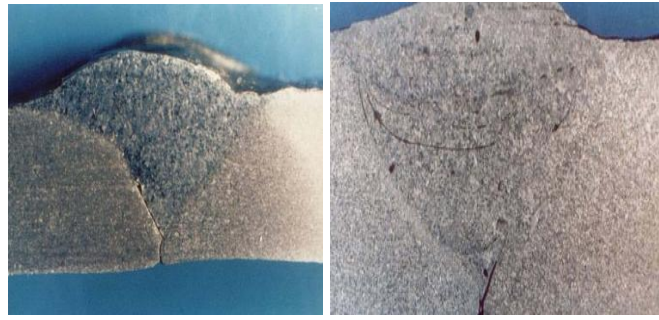


Figure II.10 : manque de pénétration

Causes possibles :

- Mauvaise préparation des bords.
- Energie de soudage insuffisante.
- Vitesse d'avance trop élevée.
- Reprise envers sans grugeage préalable.

Défauts de forme :

A. Caniveaux :

C'est un manque de métal en forme de sillon en bordure du cordon, ils sont dus à un courant de soudage trop intense et à une technique opératoire défectueuse, ils sont fréquents lors du soudage en position verticale lorsque l'électrode est animée d'un balancement à cordon trop rapide et ne comportant pas un temps d'arrêt de part et d'autre à la surépaisseur.

Leur présence peut compromettre la résistance à la fatigue.



Figure II.11 : caniveau.

B. Effondrements :

C'est un affaissement du métal déposé dû à une fusion excessive, il entraîne une mauvaise répartition des contraintes et un risque de rupture différé dans le temps.



Figure II.12 : effondrement et excès de pénétration

C. Défaut d'alignement :

Une dénivellation provient d'un montage incorrect des éléments à assembler ou de la rupture du pointage avant soudage.

Elle est assez fréquente lorsque l'on soude des tôles d'épaisseurs différentes. Dans ce cas certains codes ou spécification fixent la valeur de la pente des débardages qui permettent un raccordement progressif.

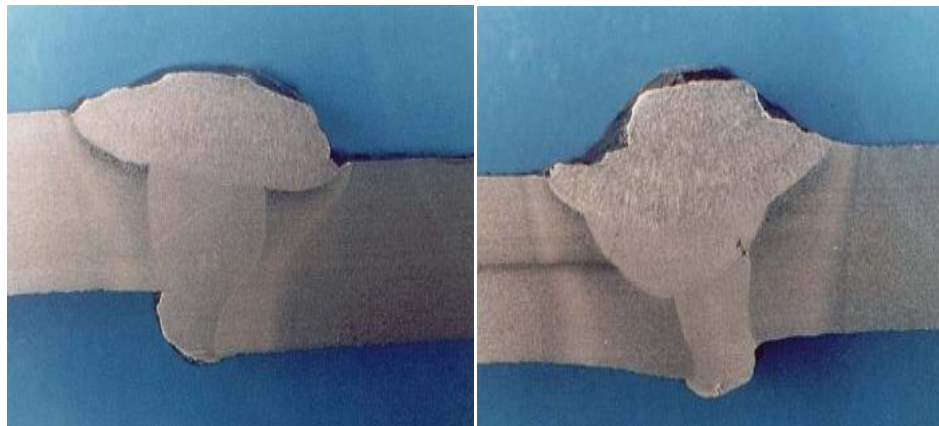


Figure II.13 : alignement.

III.1 Procédé de soudage sous flux en poudre(SAW)

Le procédé de soudage utilisé dans notre étude est le soudage à l'arc sous flux en poudre avec fil électrode (procédé automatique) dont le principe est suivant :

Le soudage à l'arc sous flux en poudre utilise un ou plusieurs fils nus ou un feuillard fusible, l'énergie mise en œuvre pour réaliser le joint et produite par le passage d'un courant électrique entre l'électrode et la pièce à souder, au travers d'un milieu constitué par un laitier résultant de la fusion d'un flux en poudre recouvrant l'extrémité du fil, l'arc et le bain de fusion.

Ce procédé n'est utilisé qu'en automatique.

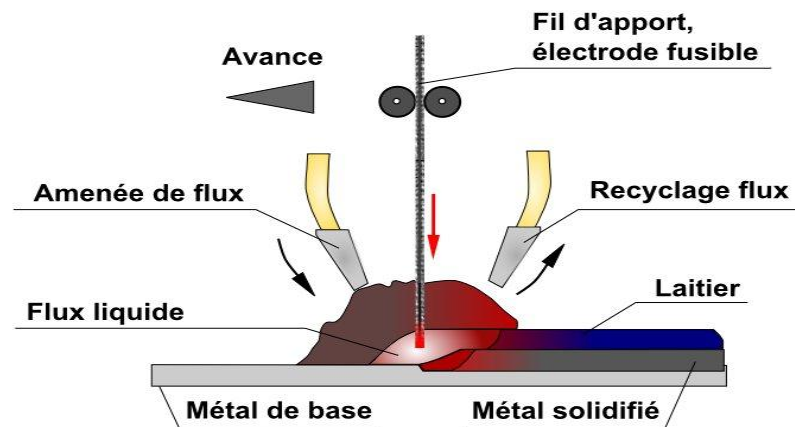


Figure III 1 : Procédé de soudage sous flux en poudre(SAW)

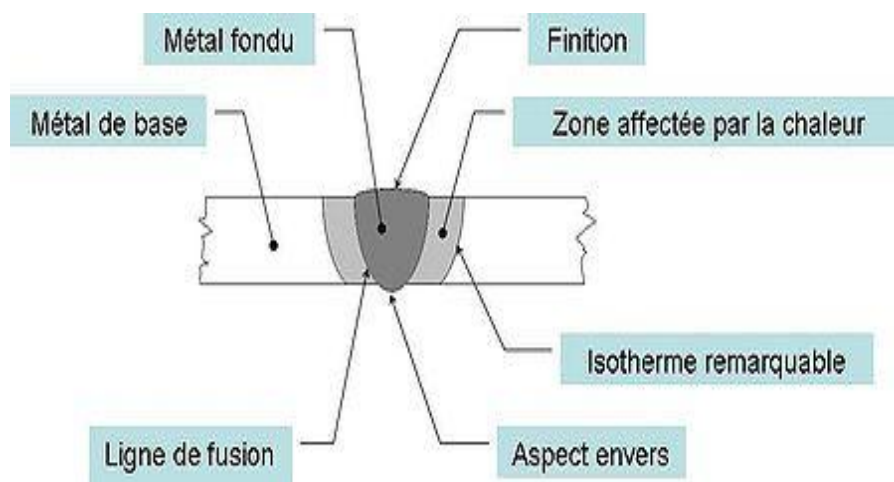


Figure III.2 : zones après soudage.

III.2. Domaine d'application de soudage :

Le soudage sous flux en poudre s'applique principalement au soudage des aciers ferritiques et austénitiques. Sa forte pénétration, sa haute productivité, son prix de revient, le destinent aux fortes épaisseurs (>5mm), par exemple, il autorise grâce aux énergies de soudages élevées l'assemblage bout à bout en une seule passe de 15mm d'acier sur bords jointifs chanfreinés.

Les principales applications se trouvent dans le domaine de la charpente métallique. La construction navale, de la grosse chaudronnerie.

III.3. Avantage du procédé :

Ce procédé est avantageux pour déposer des quantités importantes de métal. Les dépôts sont de bonnes qualités notamment avec l'utilisation de flux basique.

- ✓ Il est utilisé à forte intensité (250-400A en monofils) jusqu'à 1500 A en multi fils ou en feuillard.
- ✓ Il permet des vitesses d'avance élevées (jusqu'à 3m /mm) et le taux de dépôt est important (2.5-12kg/h en mono fils).
- ✓ Il a un pouvoir de pénétration élevé ce qui conduit à une simplification de la préparation des bords.
- ✓ L'arc n'est pas visible et ce procédé ne génère ni projection ni fumée de soudage.

III.4. Inconvénients Le soudage sous flux en poudre(SAW) :

- ✓ Usage limité à la préfabrication en atelier.
- ✓ Limité aux joints à plat (angle et bout à bout).

III.5. Paramètres de soudage et leurs influences :

Les tubes seront fabriqués et soudés selon le procédé automatique sous flux. Le soudage sera fait en deux passes dont l'une à l'intérieur et l'autre de tube.

Les paramètres de soudage à utiliser au niveau des machines à souder pour l'épaisseur 14.30mm sont :

SOUDAGE INTERIEUR		SOUDAGE EXTERIEUR	
INTENSIT (A)	TENSION(V)	INTENSIT (A)	TENSION(V)
800/825	33/34	825/850	33/34

Tableaux III.1 : paramètres de soudage

- Vitesse de soudage : 0.75m/mm.
- Nuance d'acier : X70.
- Epaisseur de la bande : 14.3 mm.
- Largeur de la bande cisaille : 1680mm.
- Diamètre du fil de soudage INT/EXT : 4mm-L70/LNS140A.
- Flux de soudage : P223.

En soudage mono-fil, les résultats dépendent principalement de l'intensité, de la tension d'arc, de la vitesse de soudage, diamètre du fil et de la polarité.

III.5.1. Influence de l'intensité :

La pénétration augmente lorsque l'intensité augmente, mais celle-ci a peu d'influence sur le largeur et la surépaisseur du cordon.

III.5.2. Influence de la tension d'arc :

Si la tension à l'arc augmente, le largeur du cordon, la consommation de flux et le risque de caniveaux augmentent.

III.5.3. Influence de la vitesse de soudage :

Plus la vitesse de soudage augmente, plus le cordon est étroit et plus la pénétration baisse.

III.5.4. Influence du diamètre du fil :

A autres paramètres constants, la pénétration augmente quand le diamètre du fil diminue.

III.5.5. Influence de la polarité :

En courant continu, on raccorde généralement le pôle (+) au film, mais si l'on met au pôle(-) :

- La pénétration diminuée.
- La stabilité de l'arc est moins bonne.
- La vitesse de fusion et le taux de dépôt augmente.

III.5.6. Influence de la longueur libre de fil (stick out) :

Généralement la longueur libre de fil est égale à 5 à 7 fois le diamètre de celui-ci. Si cette longueur augmente, la pénétration diminue, l'arc est moins stable. Par contre le taux de dépôt augmente.

III.6. Sources de puissance et équipement :

Des sources de puissance en courant alternatif et en courant continu sont utilisées pour le SAW. Si on utilise une technique à plusieurs fils, il est souvent avantageux d'utiliser du courant alternatif pour l'ensemble des fils de manière à restreindre ou à éliminer les problèmes de soufflages de l'arc. Cependant pour des raisons de pénétration, il peut être indiqué courant continu positif pour le fil d'électrode fusible. Certaines procédures de soudage peuvent admettre l'utilisation d'un fil d'apport sans devoir ajouter de flux de courant dans le bain de soudure.

L'amplitude du courant utilisé dépend considérablement du diamètre du fil de la forme de courant, il est classique d'utiliser pour le soudage de soudure en continu de tubes une intensité comprise entre 600 et 1500A.

Les sources de puissance autorégulatrices utilisant une technique à fils multiples avec du courant continu et de courant alternatif sont susceptibles d'être utilisées pour les soudures continues sur le tube.

Les ondes sinusoïdales pour les fils de courant alternatif peuvent être carrées pour plus d'efficacité.

III.6.1. Nature et utilisation des fils :

Le choix du fil électrode est fait en fonction :

- Du matériau à souder (nuance ou qualité).
- De l'épaisseur.
- Du mode opératoire.

Il y a différents diamètres possibles (mm) : 1.2-1.6-2.0-3.2-4.0.

Celle-ci mesure la vitesse de fusion, elle est principalement fonction :

- Du diamètre de fil.
- De la nature du courant (continu ou alternatif)
- De la nature de fil.
- De l'intensité appliquée.
- De la polarité.

Sa composition la suivante :

C0.10% ; Mn1% ; Si0.10% ; Mo0.05% ; Fe98%.

Ce produit incombustible doit être stocké dans des containers pour éviter la reprise d'humidité

Taille de grains 0.05à2mm

Non soluble dans l'eau. La densité 1.0g/cm³

III.6.2. Flux :

Les flux agglomérés ont un aspect mat par rapport aux flux fondus. Pour fabriquer ce type de flux, les constituants sont mélangés à sec puis liés avec du potassium ou du silicate de sodium. Le flux est ensuite chauffé à une température inférieure au point de fusion et reste ainsi à l'état d'une poudre ensuite triée au tamis et emballée.

Le flux aggloméré de soudage utilise dans la soudure des tubes en ALFAPIPE est de type P223, sa composition est :

Magnésie 20%, Fluorures20%, Silice20%, Alumine20%

- Produit incombustible.
- Doit être tenu à l'abri de l'humidité pour éviter la rouille.
- Non soluble dans l'eau.
- Densité 7.8g/cm³.
- Ce produit peut être éliminé comme un DIB ou être recyclé, conformément à la réglementation locale.

III.6.2.1 Avantage :

- a) Addition de désoxydants et de ferroalliages.
- b) Peuvent être codés par couleur.
- c) La profondeur du flux est moins importante.

III.6.2.2.Inconvénients :

- a) Le flux est hygroscopique c.à.d. que le flux a tendance à absorber l'humidité.
- b) Le processus de séchage du flux est plus important.
- c) Les laitiers en fusion risquent davantage de provoquer des porosités.
- d) Le recyclage est plus difficile à réussir car il est plus difficile d'éliminer les impuretés et de tamiser.

III.6.2.3. Influence de l'épaisseur de la couche du flux :

Elle doit être suffisante pour assurer une bonne protection du bain de fusion liquide pour éviter les projections, les arcs visibles.....pratiquement on fera en sorte que le lit de flux arrive un peu au-dessus du tube contact.

III.6.2.4. Etuvage des flux :

Pour les soudures pour les quelques il y a un risque de fissuration à froid, on utilise des flux agglomérés dits « bas hydrogène », c.à.d. qu'ils ne sont pas susceptibles de produire un taux d'hydrogène diffusible supérieure à 5 ml/100g de métal fondu. Avant utilisation, ces flux doivent être étuvés dans des conditions proches de ce que l'on pratique pour les électrodes basiques.

Exemple :

- **200°C pendant 2heurs.**
- **400°C pendant 1heure.**

III.6.2.5. Recyclage de flux :

Le flux non consommé, collecté après la fin du soudage, devra être épuré de tout contaminant (laitier, métal....etc.).

Un ajout de 10à40% de flux neuf recommandé pour maintenir la granulométrie initiale du flux.

III.6.2.6. Couple flux/fil :

En soudage (et en rechargement) on fait une association d'un fil et d'un flux. Les caractéristiques d'un joint ne sont toutefois pas seulement fonction du fil et du flux employé, mais en fait du trinôme :

Métal de base *fil*flux

III.6.2.6.1 Choix du couple fil/flux :

Il dépend :

- La nuance de la tôle.
- Du nombre de passes.
- De la préparation des bords à souder.
- Du procédé de soudage (énergie de soudage, mon, ou bi fil.
- De la nécessité ou non de faire un post chauffage.

III.7. Spécification API 5L :

42ème édition – JANVIER 2000 COMPOSITION CHIMIQUE (en %) SUR COULÉE ET SUR PRODUIT

Nuances	Carbone maxi	Manganèse maxi	Phosphore maxi	Soufre maxi Autres
A	0.22	0,90	0,030	0,030
B	0.26	1,20	0,030	0,030
X42	0.26	1,30	0,030	0,030
X46.X52.X56	0.26	1,40	0,030	0,030
X60	0.26	1,40	0,030	0,030
X65	0.26	1,45	0,030	0,030
X70	0.26	1,65	0,030	0,030

Tableau III.2 : Spécification API 5L

- a) Pour chaque réduction de 0,01 % de la teneur maximale en carbone, la teneur maximale en manganèse peut être augmentée de 0,05 %, jusqu'à un maximum de 1,50 % pour les nuances X42 à X52, et 1,65 % pour les nuances au-dessus de X52 mais inférieures à X70, et 2,00 % pour les nuances X70 et plus.
- b) Du niobium, du vanadium, du titane ou une combinaison de ces trois éléments peuvent être utilisés, après accord entre le client et le fabricant.
- c) La somme des dosages de niobium, vanadium et titane ne peut excéder 0,15 %.
- d) D'autres compositions chimiques peuvent être fournies par accord entre l'acheteur et le fabricant, sous réserve que les limitations de la note d et celles des tableaux pour le phosphore et le soufre soient satisfaites.

III.7.1 Ordre d'exécution pour le soudage automatique sous flux à ALFAPIPE :

SOUDAGE INERIEUR		SOUDAGE EXTERIEUR	
INTENSITE (A)	TENSION (V)	INTENSITE (A)	TENSION (V)
800 / 825	32 / 34	775 / 825	32 / 34

Tableau III.3 : Ordre d'exécution pour le soudage ALFAPIPE

- Vitesse de soudage 0.78-0.81 m/min
- Nuance d'acier X70 M PSL2 (API5L)
- Epaisseur de la bande 14.30 mm
- Largeur de la bande cisailée 168 mm
- Diamètre du fil de soudage INT / EXT 4mm (LNS 140 A / S2M)
- Flux de soudage p22 (Lincoln) / ELIFLUX BFB (GEKA)
- Calcule l'angle de production :

$$\sin \alpha = L_c / \pi \cdot D$$

Lc : largeur cisailée

D : diamètre

- Bobine brute à 1700 mm
- Largeur cisailée 1680 mm

$$\sin \alpha = 1680 / 3.14 \cdot 1066.8 \quad \sin \alpha = 0.5042'' \cdot 25.4 = L_c$$

$$L_c = 1066.8$$

$$\alpha = \arcsin \alpha = 30^\circ$$

Vitesse d'avance m/min	Epaisseur de la bande (mm)	Largeur cisailée (mm)	Diamètre du fil de soudage (mm)	L'angle en (°)
V1 = 0.75	14.30 mm	1680	4	30
V2 = 0.79	14.30 mm	1680	4	30
V3 = 0.81	14.30 mm	1680	4	30

Tableau III.4 : variation de la vitesse et de l'angle

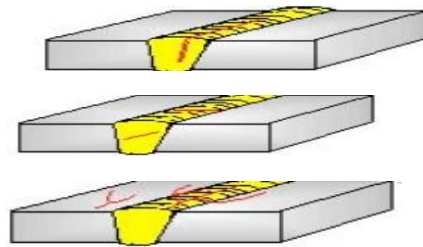
III.8. Défauts de soudage rencontré :

La classification des défauts de soudure conformément à la norme **NF EN 26250**.

- a- Groupe 1 : Fissures.
- b- Groupe 2 : Cavités.
- c- Groupe 3 : Inclusion solide.
- d- Groupe 4 : Manque de fusion / Manque de pénétration.
- e- Groupe 5 : Défauts de forme.

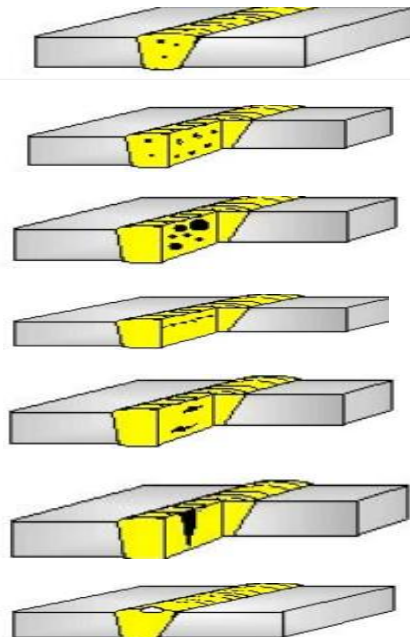
a) GROUPE N°1 : FISSURES :

- fissures longitudinales
- fissures transversales
- fissures rayonnantes



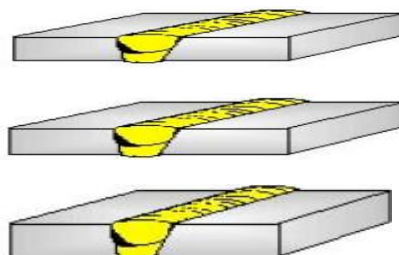
b) GROUPE N°2 : CAVITES :

- a) soufflures sphéroïdales
- b) soufflures uniformément
- c) nids de soufflures
- d) soufflures alignées
- e) soufflures allongées
- f) soufflures vermiculaires
- g) piqures



h) GROUPE N°3 : INCLUSIONS SOLIDES :

- inclusions de laitier
- inclusions de flux
- inclusions d'oxydes

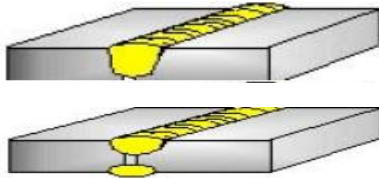


- inclusions métalliques



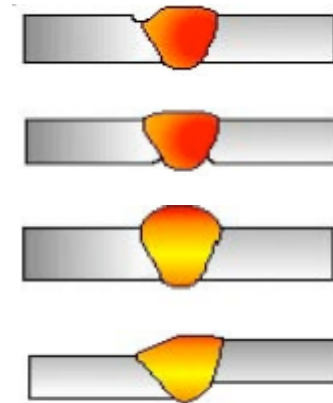
i) GROUPE N°4 : MANQUE DE PENETRATION :

- manques de fusion des bords
- manques d'interpénétration



j) GROUPE N° 5 DEFAUTS DE FORME :

- caniveaux
- caniveaux à la racine
- surépaisseurs excessives
- défauts d'allonge



III.9. Conclusion :

Les paramètres opératoires du procédé de soudage SAW utilise a ALFAPIPE sont optimisés en fonctions de plusieurs facteurs, la norme API 5L définit les modalités d'application. Parmi les facteurs déterminants on cite :

- Les paramètres métallurgiques MB : L'épaisseur MB,
- Les paramètres métallurgiques du métal d'apport :
- La vitesse de déplacement (soudage)
- Les paramètres électriques : Tension et courant de l'arc

Plusieurs facteurs contribuent à la variabilité de la qualité de la soudure, si certains paramètres sont constant et prédéfinis à l'avance conformément aux procédures et aux normes API en vigueur, les paramètres variant dans le temps et au cours du procédé de soudage tel que les grandeurs électriques de l'arc (U, I, R) méritent d'être étudié en détails : Le projet de la nouvelle version de la norme API en tiendra compte. Cet aspect fera l'objet d'un éventuel travail futur.

IV.1. Introduction :

La qualité est un objectif important depuis que les besoins de consommateurs ont été intégrés dans la boucle de décision et elle devient un véritable outil stratégique et offensif pour faire face aux nouveaux enjeux de l'entreprise [1]. Elle est actuellement considérée comme un des leviers principaux avec lesquels une entreprise peut augmenter sa position concurrentielle globale. La qualité est devenue essentielle pour s'assurer que les produits d'une entreprise satisfont les besoins des clients et ceci quel que soit leur domaine d'activité ou leur taille. Ce constat requière ainsi de la part des entreprises une maîtrise et une amélioration quasi continue de l'ensemble de leurs processus afin de garantir la performance attendue et la satisfaction de leurs clients pour assurer leur pérennité et compétitivité.

IV.2.Définition de la qualité :

Le mot « qualité » est de plus en plus utilisé dans les entreprises, que ce soit dans le secteur industriel, alimentaire ou même dans le secteur des services. La norme NF X 50 -120 [2] définit la qualité comme étant : « l'ensemble des caractéristiques d'une entité qui lui confèrent l'aptitude à satisfaire des besoins exprimés et implicites ». Cette définition est doublement générique, il faut préciser la qualité « de quoi » (d'un produit, d'un processus, d'un service, ...) et aussi les besoins « de qui » (un utilisateur, un consommateur, un chef de projet...). Le terme qualité ne peut donc pas être défini dans l'absolu mais toujours relativement à quelque chose et pour une entité donnée. En effet, le terme « qualité » regroupe plusieurs aspects en fonction du besoin ou de la phase abordée [3], [4], [5] :

De son côté, la norme ISO 9000:2000 [6] donne une définition de la qualité « aptitude d'un ensemble de caractéristiques intrinsèques à satisfaire des exigences ». Elle précise de plus que « le terme Qualité n'est pas utilisé pour exprimer un degré d'excellence dans un sens comparatif... non plus dans un sens quantitatif pour des évaluations techniques... La qualité d'un produit ou service est influencée par de nombreuses phases d'activités interdépendantes, telles que la conception, la production, le service après-vente et la maintenance... ». En effet, dans la pratique, les différents aspects de la qualité peuvent se réunir sous deux formes [7] :

- La **qualité externe**, correspondant à la satisfaction des clients. Il s'agit de fournir un produit ou des services conformes aux attentes des clients afin de les fidéliser et ainsi améliorer sa part de marché.
- La **qualité interne**, correspondant à l'amélioration du fonctionnement interne de l'entreprise. L'objet de la qualité interne est de mettre en œuvre des moyens permettant de décrire au mieux

l'organisation, de repérer et de limiter les dysfonctionnements. Son objectif essentiel est de mieux maîtriser et améliorer la qualité des produits et aussi la qualité de tous les processus de l'entreprise. Cette qualité interne passe généralement par une étape d'identification et de formalisation des processus internes réalisée grâce à une démarche participative.

IV.3. Qualité des tubes soudés en matériaux métallique :

Au sein de l'entreprise la qualité des tubes soudés en matériaux métalliques sont influencée par différents paramètres que l'on identifie au cours du processus de fabrication, des tests de contrôle sont effectués pour qualifier le processus selon la norme API 5L,

IV.3.1 Maîtrise de processus :

Dans un processus, quand on est en présence d'un nombre relativement important de données, il est souvent difficile par un simple survol des chiffres de déterminer la manière dont se distribuent les résultats. On parle donc de la maîtrise de processus

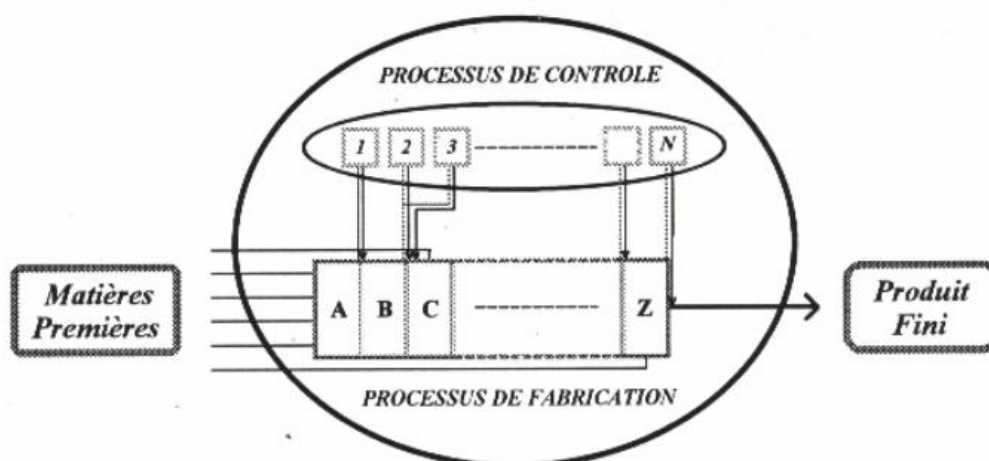


Figure IV.1 : processus de production [8]

IV.3.2 Carte de contrôle :

On appelle carte de contrôle toute donnée qu'à partir de laquelle on acquiert progressivement une plus grande régularité dans les performances d'un processus, elle fait appel aux statistiques : on peut contrôler le procédé statistiquement par la mise en œuvre d'outils appropriés. Des méthodes d'échantillonnage sont ainsi déterminées pour chaque élément de la réception de la matière première jusqu'au produit fini, le choix du plan d'échantillonnage est d'une importance primordiale en raison du caractère des éventuelles erreurs générées.

L'emploi des méthodes statistiques pour le contrôle qualité est basé sur les principes suivants :

- Prévenir les effets des dérèglages d'une fabrication, au lieu de trier les produits défectueux en fin de production.
- Diminuer le coût de la production.

Le contrôle au cours de fabrication des tubes soudée en matériaux métalliques, s'applique à des produits de toute nature : matières entrante dans la fabrication, pièces ou petit ensembles, et le produit fini.

On distingue de façons de contrôle par attribut et par mesure [9].

IV.4.Examen et contrôle :

IV.4.1. Contrôle par attribut :

C'est effectuée par une classification bon ou défectueux selon une spécification dont le nombre de défauts constatés sur chaque individu caractérise la qualité de produit, le contrôle par attribut pour les tubes soudée en matériaux métalliques se prononce dans la contrôle visuelle, le test hydrostatique, l'ultra-sang et la radiographie

IV.4.1.1. Contrôles visuels :

L'examen visuel est le plus simple et le premier des contrôles devant être mise en œuvre. Il permet de déceler les défauts de formes aux autres défauts débouchant en surface des joints soudés. L'inspection est faite sous un niveau d'éclairage d'au moins de 350 lux. L'évaluation métrologique des tubes soudés à l'arc sous flux en poudre comporte les paramètres suivants :

Paramètre	Unité	Méthode de mesure
Diamètre	mm	Micromètre (ruban gradué)
Epaisseur de la paroi	mm	DM2 (micromètre)
Longueur	mm	Double décimètre
Effet de toit	mm	Comparateur
Dénivellation (décalage de soudure)	mm	Comparateur

Hauteur du cordon de soudure	mm	Calibre d'élévation
Largeur de cordon de soudure	mm	Règle

Angle de chanfrein	mm	Compas de chanfrein réglable
Talon de chanfrein	mm	Règle
Enfoncement	mm	Règle
Masse de tube	Kg	Balance

Tableau IV.1 : paramètre de contrôle visuel.**IV.4.1.2.Epreuve hydrostatique :**

Chaque tube subit l'épreuve hydrostatique au niveau de l'installation relative à ce test (banc d'épreuve hydrostatique) avant tout test non destructif final.

Les tubes sont testés à 90% de leur limite élastique selon API 5L et la spécification du client, en respectant la réglementation algérienne (DDP). Chaque tube doit être maintenu à la pression d'essai pendant au moins 15 secondes. Les étapes de l'épreuve sont enregistrées automatiquement à l'aide des courbes.

IV.4.1.3. Contrôle aux ultrasons automatiques (après test hydrostatique) :

Le contrôle aux ultrasons est réalisé sur le cordon de soudure, le métal de base et les extrémités du tube afin de détecter tout défaut. Les résultats du contrôle sont enregistrés automatiquement sur PC et imprimé sur papier (rapport Ultrason ou numéro du tube y est reporté ; les indications des défauts sont affichées d'une manière acoustique et optique). Pour contrôler la fiabilité de l'installation ultrasonique, un tube étalon est passé périodiquement en contrôle début et fin de chaque poste de travail, l'inspecteur s'assurera que tous les défauts artificiels créés sur ce tube sont repérés lors du contrôle.

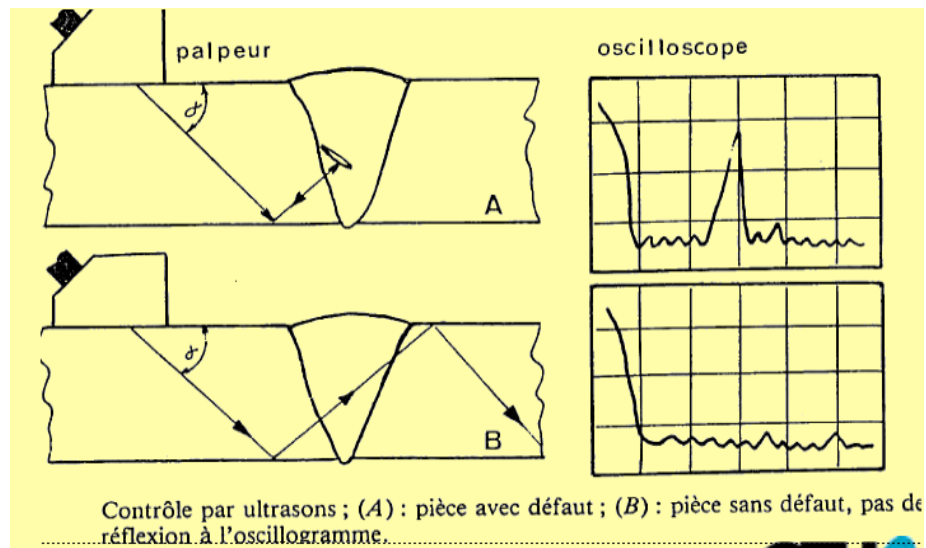


Figure IV.2 : CND Ultrason

- La fréquence entre 20 KHZ et 50 KHZ
- Contrôle par ultrason :

1. Longitudinale :

$$Vl = \sqrt{E(1-\epsilon) / \rho(1+\epsilon)(1-2\epsilon)}$$

Vl : vitesse de propagation de l'onde longitudinale

E : module de young Pa

ε : Coefficient de poisson

P : masse volumique Kg/m³

2. Transversale :

$$Vt = \epsilon / \rho(1+\epsilon)$$

ACIER	Masse volumique	7.8
	Vitesse onde longitudinal	5900
	Vitesse transversale	3250

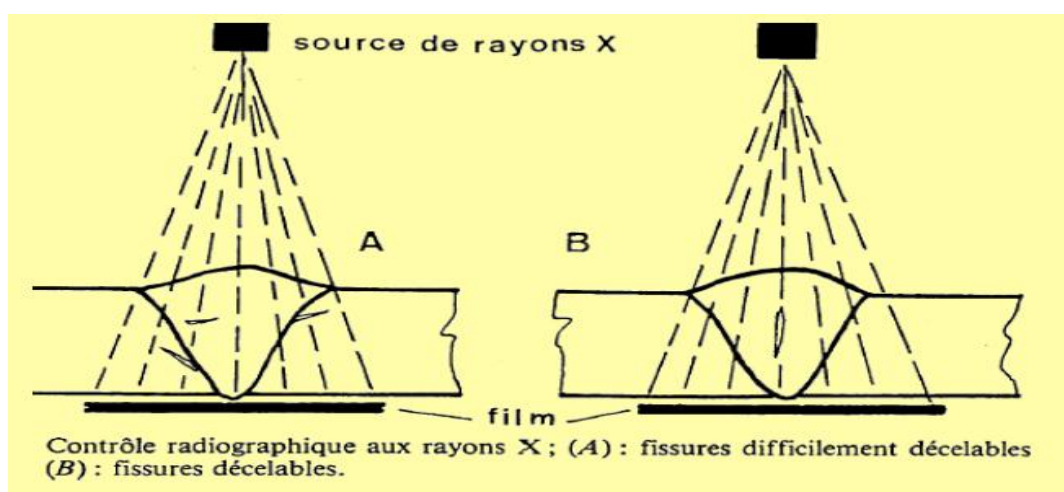
Tableau IV.2 : caractéristique de l'acier**IV.4.1.4. Contrôle par radiographie :****Principe :**

Ce contrôle est basé sur l'absorption différentielle du rayonnement X ou gamma. Les différences de rayonnement émergeant de la pièce engendrent sur le film une « image latente » qui sera ensuite révélée par voie chimique.

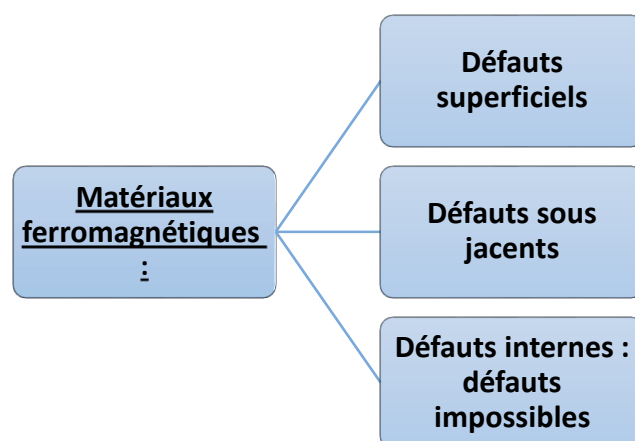
Le contrôle radiographique des soudures est effectué dans deux chambres à rayons X. le cordon de soudure est visualisé en totalité par radioscope. Toute fois le repérage de défaut est sanctionné par une prise de clichés.

Un marquage indélébile repère l'endroit du défaut. Le contrôle des réparations et des indications de l'ultrason ainsi que les extrémités des tubes est réalisé au niveau de la chambre à radiographie.

Pour la traçabilité un dossier film est instauré pour chaque tube. Les contrôles par radiographie sont confiés à un personnel certifié niveau2 (COFREIND niveau2). Une importance particulière doit être accordée à la sécurité lies au rayonnement ionisant (Type de rayonnement X, gamma)

**Figure IV.3** : CND Radiographie

IV.4.1.5. Contrôles par magnétoscopie :



Aussi appelé « **examen par aimantation** », ce procédé s'applique qu'aux matériaux ferromagnétiques : les aciers (sauf austénitiques), les fontes, le nickel, le cobalt.

La magnétoscopie permet de déceler les défauts débouchant à la surface du cordon de soudure, voire même légèrement sous-jacent. Elle est utilisée particulièrement pour la réparation du cordon de la soudure. Après chaque grugeage suivi d'un meulage. Un contrôle magnétoscopique par contraste est effectué pour s'assurer de l'élimination totale de défaut signalé par la chambre noire. La zone à réparer est contrôlée par radiographie.

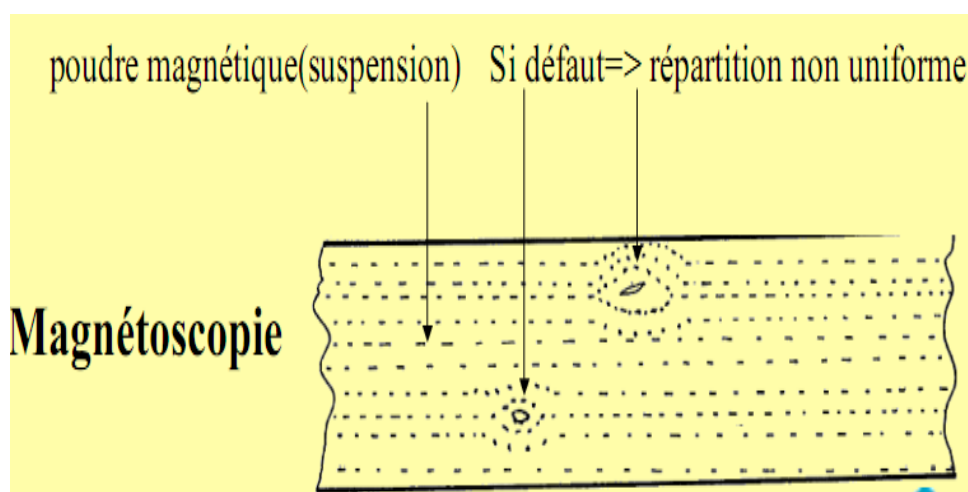


Figure IV.4 : CND magnétoscopie

IV.4.1.6. Contrôle final :

C'est un contrôle visuel dimensionnel qui consiste en un contrôle interne et externe de chaque tube en contrôlant les renseignements mentionnés sur la carte tube. Le tube est alors réceptionné ou classé, un numéro séquentiel lui sera attribué. Le contrôleur final veille au marquage des tubes selon la procédure en cours.

IV.4.2. Contrôle par mesure :

Sa concerne toute grandeur mesurable influence la qualité de produit s'effectue par un contrôle de la moyenne c'est à dire tendance centrale de la fabrication, et aussi par le contrôle de l'écart-type) c'est-à-dire variabilité de la fabrication.

Au cours de la fabrication des tubes soudées en matériaux métalliques des échantillons sont prélever pour effectuer des essais mécaniques de pliage, résilience, traction et macro dureté, et aussi sont subit à une analyse chimique intéresse plus particulièrement par le taux de carbone et les éléments d'additions (Nb, V, Ti).

IV.4.2.1. Analyses chimiques :

Le contrôle de la composition chimique se fait sur le métal de base. Les résultats d'analyses sont comparés avec celle du fournisseur et les exigences du client, ce qui permet de définir les premiers critères d'acceptation du produit en composition chimique et en carbone équivalent (spectromètre à étincelle).

IV.4.2.1.1. Carbone équivalent :

$$Ceq = \%C + \%Mn + (\%Cr + \%Mn + \%V)/5 + (\%Cu + \%Ni)/15$$

Le carbone et le manganèse ont l'impact le plus important sur la valeur du Ceq en ce qui concerne les aciers modérément alliés. C'est pourquoi pour des calculs d'ordre général, la formule peut parfois être raccourcie :

Le Ceq pour le tube et les soudures correspondantes est en principe inférieur à 0.4% [?].

$$Ceq = C + Mn/6$$

La formule du Ceq pour l'usine selon l'API 5L est :

$$Ceq = C + Si/30 + (Mn + Cu + Cr)/20 + Mo/15 + Ni/60 + V/10 + 5B$$

ELEMENTS CHIMIQUE-%															
C x10 ⁻²	Si x 10 ⁻²	Mn x 10 ⁻²	P x 10 ⁻³	S x 10 ⁻³	Cr x 10 ⁻³	Ni x 10 ⁻³	Mo x10 ⁻³	Al x 10 ⁻³	Sn x 10 ⁻³	Cu x10 ⁻³	Nb x 10 ⁻³	Ti x 10 ⁻³	Vx 10 ⁻³	(Nb+Ti+V)x10 ⁻³	Ceq x10 ⁻²
12	45	170	25	15	300	300	100	50	10	250	60	60	100	150	30,33
7	35	158	0	3	41	32	9	46	1	22	57	4	80	141	27,50
8	36	160	0	4	42	32	9	47	1	22	58	4	80	142	28,00
8	36	168	0	5	43	32	9	47	2	23	59	4	80	143	29,33
8	36	168	0	6	43	32	9	47	2	22	59	4	80	143	29,33
7	34	162	0	4	52	50	11	36	1	21	58	3	80	141	28,17
8	34	163	0	4	52	49	10	35	1	21	60	3	80	143	28,50
7	33	163	0	4	52	50	11	35	1	22	57	3	80	140	28,33
8	34	160	0	5	35	24	5	34	1	17	59	13	3	75	28,00
7	21	164	0	4	14	15	3	31	0	13	59	11	2	72	28,50
7	19	154	0	2	16	15	5	44	0	12	64	12	2	78	26,83
7	21	165	0	4	14	15	3	31	0	13	64	11	2	77	28,67
7	34	163	0	4	53	51	11	36	1	22	57	3	80	140	28,33
8	36	167	17	0	50	32	8	33	1	19	56	4	80	140	29,17
7	34	166	0	4	39	31	5	34	1	20	57	3	90	150	28,83
7	34	165	0	4	39	31	5	35	1	20	56	3	80	139	28,67
6	34	164	0	3	39	32	5	35	1	20	55	3	80	138	28,33
7	20	167	0	4	30	15	4	29	0	10	65	10	2	77	29,00
6	22	161	17	0	29	16	6	32	0	16	61	12	2	75	27,83
7	34	166	0	5	40	31	5	34	2	20	56	3	90	149	28,83
6	20	156	0	3	16	16	5	37	0	14	57	4	80	141	27,00
7	20	167	0	4	31	16	4	29	0	10	64	10	2	76	29,00
9	35	164	0	5	53	29	9	36	2	19	55	4	80	139	28,83
8	36	164	0	4	54	30	10	36	2	19	55	4	80	139	28,67
8	20	166	0	5	30	15	4	29	1	10	63	10	3	76	29,00
8	36	164	0	5	54	30	9	37	2	19	55	4	80	139	28,67

7	20	158	0	6	19	15	3	39	0	10	65	14	2	81	27,50
8	32	170	0	4	42	35	9	41	1	18	58	4	80	142	29,66
7	32	169	0	4	42	35	9	42	1	18	57	4	80	141	29,33
7	20	157	0	3	19	16	3	38	0	11	64	14	2	80	27,33
7	20	156	0	3	16	16	4	37	0	14	62	10	2	74	27,17
8	32	168	0	4	42	35	9	41	1	18	58	4	80	142	29,33
7	33	162	1	4	49	33	7	32	1	19	54	3	80	137	28,17
7	32	161	0	3	49	33	7	32	1	18	54	3	80	137	28,00
8	33	166	0	4	49	32	7	32	0	18	59	3	80	142	29,00
7	33	166	1	4	49	32	7	32	0	18	58	3	80	141	28,83

Tableau IV.3 : résultat de l'analyse chimique sur 30 échantillons**Commentaire :**

On remarque clairement sur le tableau si dessous que le taux de carbone équivalent ne dépasse pas la tolérance admissible pour qu'un acier soit soudable selon(*IIW*), par contre les faibles pourcentages montré nous amène à dire que notre acier est parfaitement soudable et comme ça le risque de durcissement de la zone affecté thermiquement est infiniment faible, sur le chapitre qui suit on va montrer la distribution des valeurs de microdureté sur les zones de soudure

IV.4.2.2. Essai de traction :

L'essai de traction consiste à soumettre une éprouvette à un effort de traction jusqu'à rupture en vue de déterminer une ou plusieurs caractéristiques mécaniques (la résistance ultime à la traction, la limite apparente d'élasticité à 0.2% et l'allongement caractéristiques pour le métal de base et la résistance à la traction du cordon de soudure.

1. La limite d'élasticité (R_e) : MPa
2. La résistance à la traction (R_m) : MPa
3. Le pourcentage d'allongement après rupture ($A\%$)

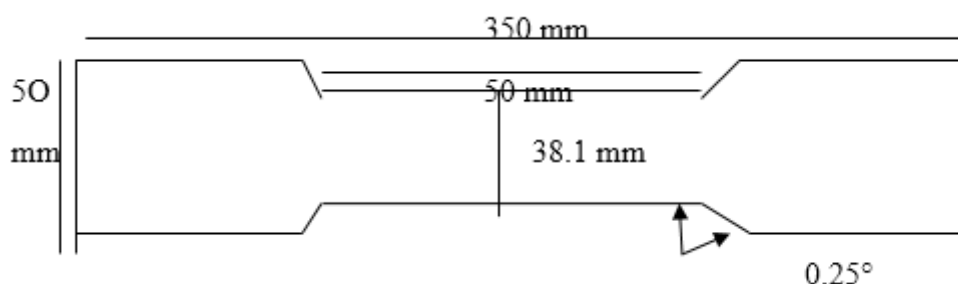


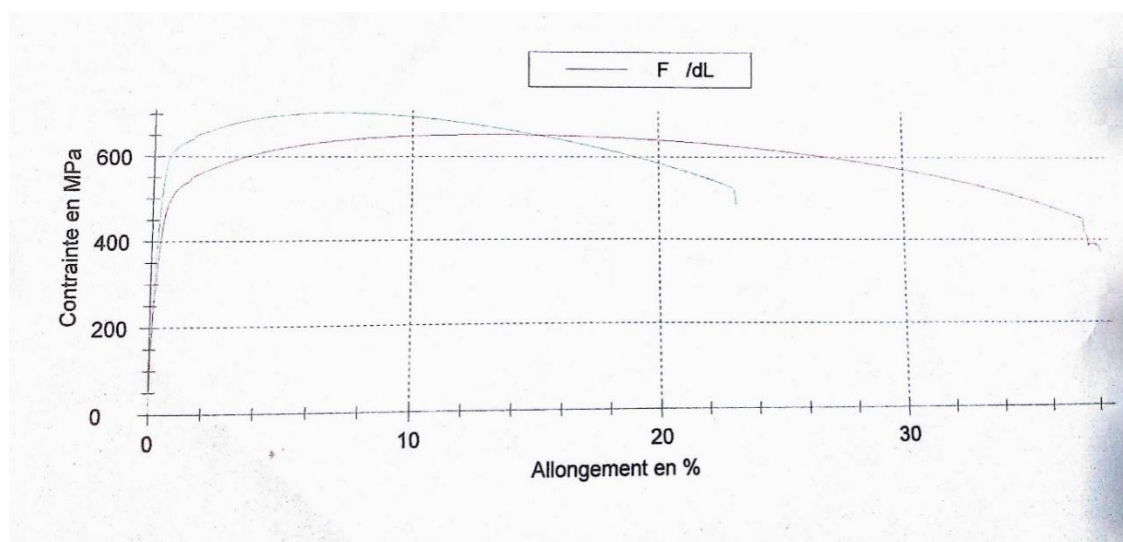
Figure IV.5 : éprouvette normalisée selon la norme API5L

Eprouvette de traction		Tolérance de résultat	
		Min	Max
Sur métal de base	$R_{t0.5}(\text{MPa})$	485	635
	$R_m(\text{MPa})$	570	760
	$R_{t0.5}/R_m$	0.00	0.90
	$A_{50\%}$	22	100
Sur cordon de soudure	$R_m(\text{MPa})$	570	760

Tableau IV.4 : la norme API5L 44 édition

- La norme API5L exige deux éprouvette dans l'essai de traction :
 - T.N : traction normale.
 - T.S : traction sur soudure.
- La machine d'essai de traction utilisé ZWICK/ROELL de capacité Max 600 kn
- Les résultats sont donnés par le logiciel texspert sous forme :
 - Tableau : les caractéristiques mécaniques de métal de base et la soudure.
 - La courbe rationnelle de traction pour le métal de base.

légende	Désignation éprouvette	$S_0 \text{ mm}^2$	$R_{t0.5}(\text{MPa})$	$R_m(\text{MPa})$	$R_{t0.5}/R_m$	A50%
	TN	548	541	654	0.83	38
	TS	547	-	706	-	-

Tableau IV.5 : résultat de l'essai de traction**Figure IV.6** : Courbe rationnelle de traction sur métal de base et sur cordon de soudure**Commentaire :**

Les résultats de l'essai de traction sont conforme avec l'exigence de la norme API 5L, On remarque une légère augmentation de la résistance maximal sur le cordon de soudure par rapport au métal de base et une diminution de l'allongement.

**Figure IV.7** : Machine d'essais de traction ZWICK/ROELL

IV.4.2.3. Essai de pliage :

Deux essais de pliage en droit et en vers sont réalisés afin de rechercher toutes les imperfections de tension dans la soudure ou prouver sa bonne qualité. Après ces essais, le cordon de soudure est soumis à un contrôle visuel pour la détection d'éventuels défauts débouchant à la surface.

Pour but d'évaluer la capacité de déformation plastique d'un matériau donc de vérifier la ductilité, ses résultats sont :

1. L'éprouvette ne doit se rompre au pliage.
2. Après pliage la surface tendue de l'éprouvette ne doit pas être fissurée.

L'éprouvette de cette essai sont les mêmes utilisées dans l'essai de traction

	Longueur de crique :
Endroit	Dans le métal d'apport $\leq 3\text{mm}$
Envers	Dans le métal de base $\leq 6\text{mm}$

Tableau IV.6 : L'essai de pliage selon la norme API5L



Figure IV.8 : Machine de l'essai de pliage(machine universel)

Le résultat est fonction de l'apparition de déchirures ou arrachements provoqués par d'éventuels défauts préexistants dans la soudure (ou dans le métal de base), le critère d'acceptation étant souvent associé à une longueur de défaut préétablie à ne pas dépasser.

IV.4.2.4. Essai de résilience :

A pour but d'évaluer la résistance à la rupture fragile pour cela il met en œuvre des conditions qui favorisent le comportement fragile.

L'essai de résilience ont été réalisés sur des éprouvettes normalisées CVN 10*10 dont la géométrie selon API5L

Les éprouvettes ont été prélevées sous angle de 45° par rapport à l'axe de laminage et de trois zones la MB, S, ZAT

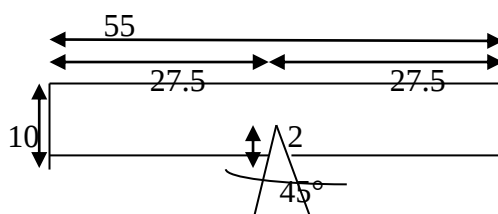


Figure IV.9 : Géométrie et prise de vue de l'éprouvette d'essai de résilience

Résilience	Transversaux	Température	Moyenne min	Individuelle min
Métal de base	3 CVN	-10°	90 J/cm ²	68 J/cm ²
ZAT	3 CVN	-10°	62 J/cm ²	50 J/ cm ²
Cordon soudure	3 CVN	-10°	62 J/cm ²	50 J/ cm ²

Tableau IV.7 : L'essai de résilience selon la norme API5L

RESILIENGE J/cm ² (-10°C)											
Kv ₁	Kv ₂	Kv ₃	Kv _{moy}	Kv _{s1}	Kv _{s2}	Kv _{s3}	Kv _{s moy}	Kv _{z1}	Kv _{z2}	Kv _{z3}	Kv _{z moy}
146	166	182	165	179	180	190	183	169	189	200	186

Tableau IV.8 : résultats de l'essai de résilience un tube



Figure IV.10 : Machine de l'essai de résilience avec l'enceinte thermique

IV.4.2.5. Essai de macro dureté :

La pratique de macro dureté nécessite la préparation des éprouvettes par des polissages par meulage à l'eau à l'aide de papiers abrasifs à indice de granulation croissante jusqu'à 600, on prépare uniquement la face qui fait l'objet de l'essai. On mesure la dureté à l'aide d'un duromètre de type : ZWICK ZHV10

On applique une masse de 10 Kg dans les 16 points (norme API5L)

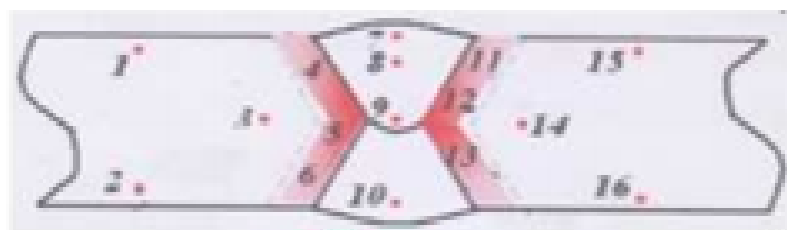


Figure IV.11 : points de mesures selon API 5L

Métal de base Maxi 250							Cordon de soudure MAXI 250					ZAT Maxi 250						
1	2	3	14	15	16	moy	7	8	9	10	moy	4	5	6	11	12	13	moy
209	216	217	232	221	228	221	221	225	232	236	229	205	216	247	216	210	220	219

Tableaux IV.9 : résultat de l'essai de macro dureté



Figure IV.12 : Macro duromètre assisté par ordinateur

IV.5 Analyse de la variabilité et évaluation de la qualité :

IV.5.1. L'évaluation de la qualité

L'entreprise est régie par des règles qui lui permettent d'atteindre des objectifs déterminés, l'audit qualité lui permettra de s'assurer que ses principes sont correctement appliqués.

IV.5.L'audit qualité :

La norme ISO9000 :2000 définit l'audit qualité comme : « processus méthodique, indépendant et documenté permettant d'obtenir des preuves d'audit et de les évaluer de manière objective pour déterminer dans quelle mesure les critères d'audit sont satisfaits ».

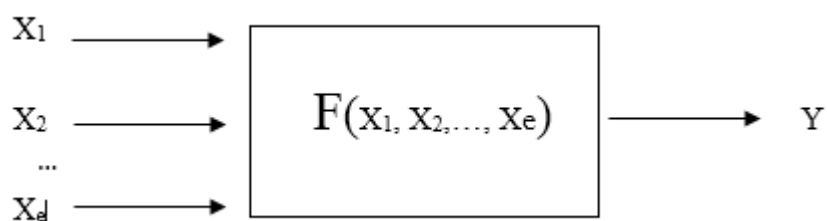
- Audit interne : appelés parfois « audits première partie », qui sont réalisés par l'organisme lui-même, au niveau de laboratoire métrologie métallurgie.
- Audit externe : « audits seconde ou tierce partie ».

L'audit qualité interne s'inscrit comme une donnée essentielle de la mesure, de l'analyse et de l'amélioration d'un système de management de la qualité. Un des objectifs essentiels de l'audit qualité interne est de définir des indicateurs qualité. Ces indicateurs doivent faire l'objet d'une analyse et, dans la mesure du possible, de la définition d'action pour améliorer la situation [10].

Généralement réalisée par les expertises du centre de recherche en technologie industriel CRTI CSC-expertise

IV.5.3.Analyse de variabilité :

En agissant sur des propriétés qui influent la qualité des tubes soudée en spirale, avec des examens répétitifs des tests mécaniques sur des échantillons de différents tubes de test dite tube sacrificiel, les résultats obtenus sont présentés sur le tableau !n, on considère plusieurs paramètres d'entrées ($X_1, X_2, \dots, X_e$) qui vont influencer la grandeur de sortie notamment la qualité



Echantillons	x_1 :Traction	x_2 :Dureté	x_3 :Résilience	x_4 :%(Nb+Ti+V)	x_5 :%Céq
1	529	223	186	141	27,50
2	528	220	237	142	28,00
3	489	216	184	143	29,33
4	520	219	211	143	29,33
5	500	215	227	141	28,17
6	536	222	269	143	28,50
7	518	220	220	140	28,33
8	519	226	166	75	28,00
9	527	220	231	72	28,50
10	568	225	297	78	26,83
11	503	223	238	77	28,67
12	506	218	221	140	28,33
13	522	224	270	140	29,17
14	531	220	222	150	28,83
15	546	224	145	139	28,67
16	529	218	153	138	28,33
17	490	221	245	77	29,00
18	555	214	237	75	27,83
19	545	212	233	149	28,83
20	531	223	205	141	27,00
21	527	221	256	76	29,00
22	578	219	221	139	28,83
23	539	218	213	139	28,67
24	499	224	210	76	29,00
25	556	222	229	139	28,67
26	507	223	241	81	27,50
27	511	221	227	142	29,66
28	544	222	255	141	29,33
29	513	222	215	80	27,33
30	533	221	287	74	27,17

IV.5.4. Analyse de sensibilité :

Après la collecte des données sur le procès et les résultats des différents caractéristiques de l'Acier utilisé, on dispose d'un système complexe, qui à partir de facteurs $X \in \mathbb{R}^p$ retourne une sortie Y que l'on supposera unidimensionnelle. Le problème peut s'écrire sous la forme $y = f(x)$, avec f fonction inconnue. La fonction f modélise le lien entre les facteurs X et la sortie Y . nous considérons que : X sont les paramètres d'entrée, f est le code numérique (résolvant par exemple une équation différentielle) et Y est le résultat retourné par le code.

Et on écrit :

$$y = f(Hv, Rm, Kv, \%(Nb + V + Ti), \%Céq, \dots)$$

Avec : Rm , Kv , $\%(Nb+V+Ti)$, $\%Céq$, sont considérés comme paramètres d'entrées et en prend par exemple d'étude de sensibilité le Hv comme paramètre de sortie, l'erreur relative sera

$$\Delta y = \frac{\partial f}{\partial x_1} \Delta x_1 + \frac{\partial f}{\partial x_2} \Delta x_2 + \frac{\partial f}{\partial x_3} \Delta x_3 + \frac{\partial f}{\partial x_4} \Delta x_4 + \frac{\partial f}{\partial x_5} \Delta x_5$$

Il est souvent difficile de trouver le modèle f par une simple approche. Donc on s'intéressera juste par l'analyse de sensibilité de dureté à la fluctuation de Carbone équivalent

$$Hv = f(Céq)$$

Et donc on va construire un diagramme de corrélation dont l'objectif de l'étude est de déterminer si 2 variables X et Y liées, c.à.d. si en modifiant variable X ("cause supposée") $\Rightarrow$ "effet" sur Y . Cas uniquement corrélations linéaires à 2 variables. Pour corrélations non linéaires, il faut trouver transformées qui ramènent à des corrélations linéaires ($\log(x)$, x^n , ...). Pour construire diagramme de corrélation, disposer au moins de 20 couples de valeurs (X , Y). Tracer 2 axes et graduer axes de telle sorte que segmente présentant étendue valeurs de $X \sim$ longueur représentant étendue valeurs de Y .

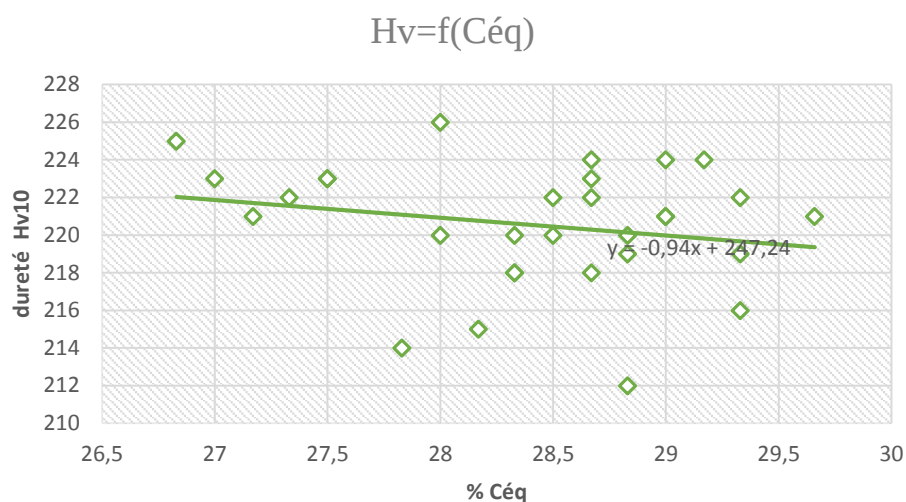


Figure IV.13 : Sensibilité de dureté au carbone équivalent

A partir du courbe de tendance de type linéaire ($ax+b$) on déduit le coefficient de sensibilité $a = 0.94$ on dit alors que les fluctuations des valeurs de dureté avec la faible variation de pourcentage de carbone équivalent

On peut aussi étudier la sensibilité d'autres caractéristiques en fonction d'une grandeur d'entrée au choix, dans le but toujours d'évaluer la qualité, l'idée est de construire une approximation de la surface de réponse f la plus générale possible afin d'obtenir les indices de sensibilité. L'intérêt de cette approche est qu'elle permet de manière plus générale de modéliser le comportement du système étudié avec peu d'hypothèses

IV.5.4.1 Spécification et tolérance :

La fabrication des tubes soudée en matériaux métallique destinés au transport des hydrocarbures suivie la norme American API (American Petroleum Institute)

Spécification : est une indication précise d'un ensemble de conditions que doit remplir un produit, un matériau ou un procédé.

Tolérance : zone de valeurs à l'intérieur de laquelle un caractère est conforme à sa spécification [10]

IV.5.4.2 Déclaration de conformité :

Les résultats des essais de contrôle qualité respect la tolérance de la norme API 5L avec peu de sensibilité c'est pourquoi l'audit arrive à qualifier le procès et on dit qu'il est aussi conforme à l'exigence.

Si nous sommes face à un modèle de non-conformité, donc un effet désirable sur une caractéristique influe la qualité, donc on va identifier les cause provoquant cette effet en utilisant des méthodes telle que : la méthode des 5M ensemble d'un diagramme cause effet, le diagramme de Pareto

- Annexe 4 -. Exemple : 'dureté élevé du ZAT'

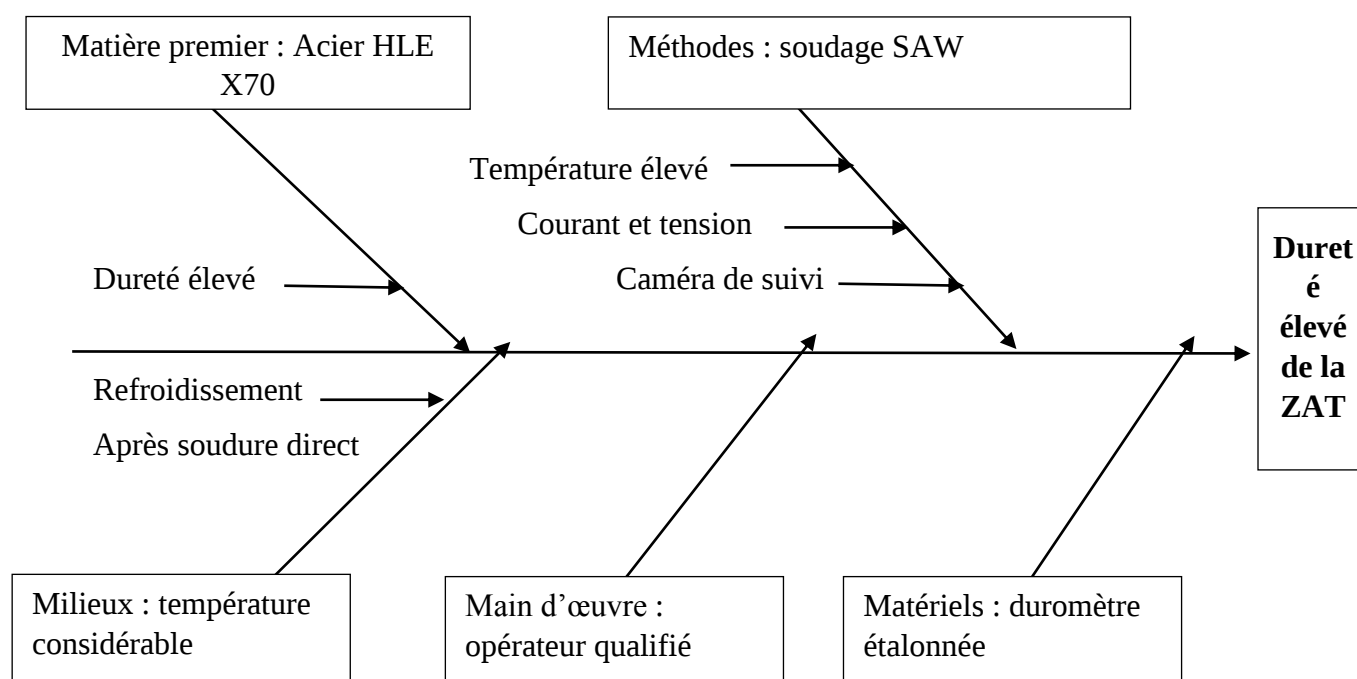


Figure IV.14 : Famille des 5M appliquée au procès de fabrication des tubes soudés en spiral

Sur la figure **IV.14** nous avons défini des cause par famille globale et des sous cause peuvent être la source de l'erreur.

Une dureté élevée sur la ZAT peut être en raison de dureté élevée de métal de base, de la température élevée de soudage, d'une faute de mesure du au matériel ou de la main d'œuvres.

Un ingénieur en qualité doit maîtriser bien ces outils de même le procès de fabrication pour contrôler et suivre la qualité dans le but d'améliorer la productivité en diminuant le coût sur le contrôle par l'utilisation des méthodes statistiques.

Discussion des résultats obtenus :

Il est souvent facile d'identifier les facteurs d'influence en utilisant la règle des 5M, néanmoins il reste complexe de quantifier avec exactitude l'importance de chaque facteur (M). Un monitoring continu et précis pourrait être développé, il nécessite la mise en œuvre de moyens de mesure et d'analyse adéquats, une analyse poussée de la traçabilité de tous les facteurs appuyée par une modélisation des données pourrait aboutir aux causes réelles. A défaut de telles démarches qui pourraient être coûteuse, on se limite à l'application de normes telles que l'API 5 L pour encadrer la variabilité dans des limites acceptables. Les futures exigences de l'API 5L par le monitoring continu des grandeurs électriques n'est qu'un exemple qui pourrait affiner les causes de variabilité de soudage SAW des tubes, une tentative a été réalisée dans ce mémoire, néanmoins elle pour faire l'objet d'un développement futur.

V .1. Généralité :

La dureté Vickers a été conçue dans les années 1920 par les ingénieurs de la société Vickers en Angleterre. Elle est caractérisée par l'empreinte faite par un poinçon sous une charge donnée durant 15 secondes. Le poinçon est formé d'une pyramide en diamant à base carrée dont les faces opposées font un angle de 136° . La charge appliquée est comprise entre 1 et 120 daN. Le côté de l'empreinte est de l'ordre de 0,5 mm, la mesure s'effectuant à l'aide d'un microscope [1]. La dureté Vickers (HV) [5] est calculée à l'aide de la formule suivante :

$$HV = 0.189 \times F / d^2 \text{ avec } d = (d_1 + d_2) / 2$$

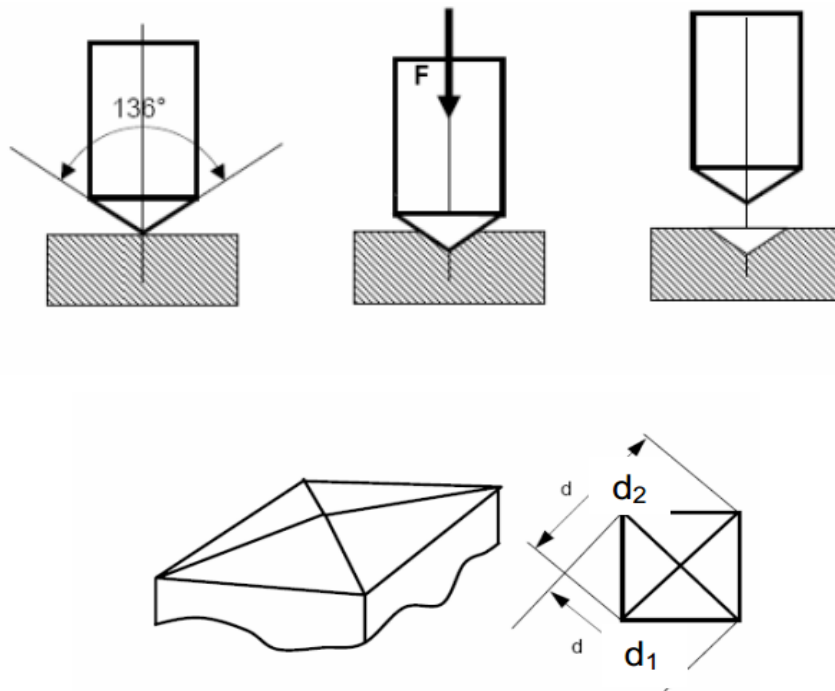


Figure V.1 : Empreinte dureté Vickers

V.2. Incertitude de mesure :

V.2. 1 Introduction :

Les instances de normalisation (ISO, BIPM, AFNOR,...) ont publié en août 1999 un « guide pour l'expression de l'incertitude de mesure ». Le concept d'incertitude est relativement nouveau dans l'histoire de la mesure bien que l'erreur et l'analyse des erreurs soient des concepts depuis toujours pratiqués en métrologie. Avant ce guide, plusieurs approches existaient pour chiffrer les incertitudes de mesurage avec les inconvénients que cela entraînait sur l'analyse et sur la comparaison des résultats[1].

V .2.2. Définition de l'incertitude :

Paramètre associé au résultat d'un mesurage qui caractérise la dispersion des valeurs qui pourraient raisonnablement être attribuées au mesurage [2]

L'incertude au sens large, d'une mesure est la zone au sein de laquelle se trouve probablement la valeur vraie. Cette zone est définie par une dispersion et se quantifie par un écart type.

Elle reflète la qualité d'un mesurage, d'un instrument ou d'une méthode employée, c'est donc un indicateur de qualité

La norme retient deux types d'incertitudes : Les incertitudes de type A et les incertitudes de type B

V .2.2.1 Vocabulaire et Notions :

- La grandeur que l'on veut mesurer est appelée mesurande.
- On appelle mesurage l'action de mesure, c'est-à-dire l'ensemble des opérations permettant de déterminer expérimentalement une ou plusieurs valeurs que l'on peut raisonnablement attribuer à une grandeur.
- Le résultat du mesurage est un ensemble de valeurs attribuées à un mesurande complété par toute information sur l'incertitude de mesure qui permet d'indiquer quel est l'intervalle des valeurs probables du mesurande[3].

—————> Expression complète du résultat de mesure :

$X = x \pm \Delta X$, unité, niveau de confiance

Avec la notion de métrologie : x la mesure de la valeur de la grandeur (un nombre), ΔX l'incertitude de mesure et X le résultat de la mesure.

Remarque :

La **valeur vraie** (X_{vrai}) du mesurande est la valeur que l'on obtiendrait si le mesurage était parfait. Un mesurage n'étant jamais parfait, cette valeur est toujours inconnue, mais on peut parler de valeur conventionnellement vraie.

V.2.3 Types d'incertitude de mesure :

V.2.3.1 L'incertitude de type A

C'est le cas où l'opérateur fait toute une série de mesures. Le traitement des erreurs est statistique: moyenne, écart-type, ... Cette analyse statistique se fait lorsqu'on a peu d'indications sur les sources d'erreurs.

Cas d'une série de mesures indépendantes, l'incertitude type est obtenue par le calcul de l'écart type.

$$S_{exp} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}$$

avec : $\bar{X}$ la moyenne des mesures : $\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i$

X est le résultat de la mesure de la grandeur G à mesurer

L'incertitude type est telle que : $u = \frac{S_{exp}}{\sqrt{n}} \dots [3]$

Si la distribution des mesures suit une loi gaussienne, alors, est un bon estimateur de l'incertitude.

V.2.3.2 L'incertitude de type B

C'est le cas où il est impossible, voire difficile de faire un calcul statistique (cas de la mesure unique). L'opérateur doit chercher et évaluer les sources d'erreurs.

Faire un bilan des erreurs :

- Les erreurs systématiques telles que l'erreur de parallaxe, le réglage du zéro de l'appareil, les erreurs de méthode, le vieillissement des composants, ...
- Les erreurs aléatoires telles que les erreurs de lecture ou dues à l'appareil lui-même, ou dues aux conditions extérieures (température et dilatation, pression atmosphérique, humidité,...).

Chiffrage des erreurs

- la norme conseil d'utiliser l'incertitude type si celle-ci est fournie par le constructeur de l'instrument de mesure.

- Si le constructeur fournit l'incertitude sous la forme : $\Delta c = \pm \dots$, alors,

L'incertitude est : $u = \frac{\Delta c}{\sqrt{3}}$

- Dans le cas des appareils de type analogiques, (exemple : multimètre à cadran, comparateur à cadran...)

L'incertitude est $u = \frac{\Delta c}{\sqrt{12}}$ où ΔC correspond à une division

• Lorsque l'incertitude suit une loi normale :

L'incertitude est $u = \frac{\Delta c}{3}$

L'incertitude-type est aussi déterminée à partir du calcul d'un écart type mais celui-ci n'est pas calculé sur une série de valeurs, mais il est « estimé » à partir d'information : expérience, certificat d'étalonnage, classe des instruments, documentation constructeur ...

V.2.3.3 Incertitude-type composée :

Lorsque l'incertitude est issue de plusieurs sources d'incertitudes indépendantes, on évaluera pour chacune de ces sources, l'incertitude $u_1, u_2, \dots, u_a$, due à chaque source.

L'incertitude sur la grandeur d'entrée est alors évaluée par une incertitude composée u obtenue par :

$$u^2 = \sum u_i^2 = \sum_{i=1}^n u_{iA}^2 + \sum_{i=1}^m u_{iB}^2$$

Lorsque l'incertitude est issue de plusieurs paramètres liés par une relation mathématique, on applique la loi de propagation des incertitudes : ce type d'incertitude est considéré comme du type B.

$$u^2(y) = \sum_{i=1}^{i=n} \left(\frac{\partial y}{\partial x_i} \right)^2 \times u^2(x_i)$$

Application de la dureté :

$$H_V = 0.189 F/d^2$$

$$u = \frac{\partial H_V}{\partial F} \Delta F + \frac{\partial H_V}{\partial d} \Delta d$$

$$\frac{\partial H_V}{\partial F} = \frac{0.189}{d^2}$$

$$\frac{\partial H_V}{\partial d} = 0.189 F \left(\frac{0 \cdot d^2 - 1 \cdot 2 \cdot d}{d^4} \right) = -0.189 \cdot F \cdot \frac{2}{d^3}$$

ΔF : Incertitude d'étalonnage de force

Δd : Incertitude d'étalonnage de diamètre

F: Force mesurée.

d: Diamètre mesuré.

$$u^2 = \sqrt{\left(\frac{-0.189 F}{2d^3} \Delta d \right)^2 + \left(\frac{0.189}{d^2} \Delta F \right)^2}$$

V.2.3.4 Incertitudes élargies :

L'incertitude élargie U s'obtient en multipliant l'incertitude-type composée u par un facteur d'élargissement.

$$U = k \times u$$

$k = 2$ pour une confiance à 95 %.

$k = 3$ pour une confiance à 99 %

V.3.Echantillon et mesure :

V.3.1 Prélèvement de l'échantillon :

Au cours de fabrication des tubes soudés en matériaux métalliques au sein de l'entreprise pour le contrôle qualité le producteur choisit aléatoirement un tube dit sacrifié pour des tests de contrôle qualité, des plaques seront découpées de ce tube d'une façon qui lui permette de contenir le cordon de soudure vu que c'est la zone concernée beaucoup plus par le contrôle



Figure V.2 : préparation de l'échantillon

Le soudage agit sur les propriétés mécaniques du matériau, la zone affectée thermiquement présente des changements remarquables influant sur la qualité du tube, à partir de la plaque découpée du tube on prélève des échantillons pour la réalisation des profils de microdureté après qu'ils subissent d'une rectification pour assurer en premier lieu la planéité, et une attaque chimique pour montrer les trois zones différemment (métal de base, zone affectée thermiquement, cordon de soudure)



Figure V.3 : rectification de l'échantillon



Figure V.4 : Attaque chimique de l'échantillon

V.3.2 Mesure de micro dureté Vikers :

Au sien de laboratoire de l'école la réalisation des profiles de mesure de microdureté Vikers est effectuée sur l'échantillon précédent dont l'opérateur c'est l'élève ingénieur concerné

V.3.2.1 Appareillage :

Un microduromètre Pour mesure de la dureté intrinsèque du matériau, équipé d'une partie mécanique et un microscope optique charge variant de 10g-1Kg

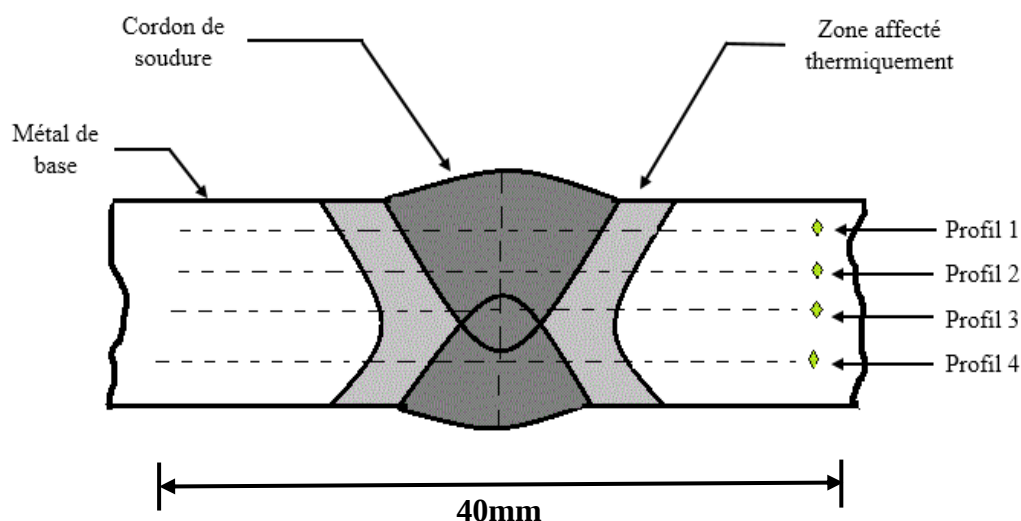


Figure V.5 : Microduromètre modèle 412 D

V.3.2.2 Paramètres de mesure

On réalise quarts profils de micro dureté sur un échantillon avec les paramètres suivant :

- distance de 40mm
- pas de 1mm
- charge appliquée de 10 gf
- temps de chargement est 10s



V.3.2.3 Résultat de mesure :

Les résultats de mesure pour les quatre profils de micro dureté sont présents dans le tableau si dessous

profil 1	profil2	profil 3	profil 4
254,4	251,4	325,5	295,3
197,9	244,2	351,9	291,6
149,6	277,5	269,2	291,6
48,5	264,4	273,3	203,2
292,6	243,5	304,9	252,9
266	299,1	320,2	320,2
289	267,6	233,4	191
259	269,2	300,1	246,4
260,5	256,6	280,1	95

235,5	208,6	272,5	268,4
296	256,6	201,6	263,6
265	235,3	310,9	271,6
236	280,1	327,7	299,1
263,6	284,4	192,4	318,1
268,4	280,1	265,2	298,2
304,9	157,3	252,1	277,5
269	270	278,4	286,2
294	294,4	303	187,9
282,7	286,2	294,4	244,4
272,5	299,1	88,6	318,1
289,8	301	278,4	276,7
310,9	270	280,9	207
288	134,7	249,2	234
368,2	277,5	122,3	317
378,9	236,7	235,4	307,9
348,9	229,5	347,1	401
333,2	131,5	258,9	196,4
286,2	290,7	232,1	266,8
270	275,8	272,5	247,8
204,8	269,2	295,3	88,7
88	308,9	299,1	342,4
196,4	272,5	310,9	297,2
114,7	244,2	335	249,3
173,3	262	252,9	340
267,6	256,6	273,3	275,8
237,3	248,5	318,1	22
334	244,9	299,1	168,4
286	297,2	300,1	250
279	292,6	244,9	255,1
269,5	321,2	275	244,9

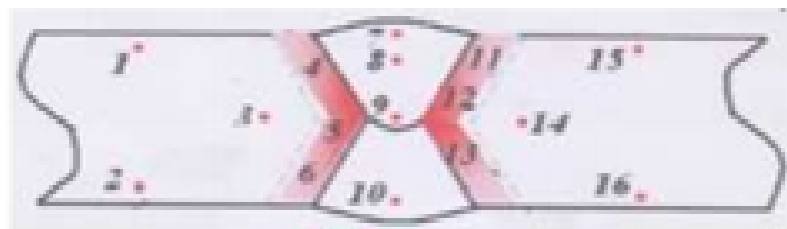
Tableau V.1 : résultat de mesure de microdureté sur quatres profils

V.4. Etude de variabilité sur la dureté :

V.4.1 variabilité de macrodureté entre les trois zone de soudage :

Le mesure de macro dureté est effectuée au scien de laboratoire métrologie métallurgie de l'entreprise selon la norme API 5L

- Métale de base (6 points)
- Zone affecté thermiquement (6 point)
- Cordon de soudure (4 points)



Avec une différence maximale de +60 entre la zone fondue et le métal de base

Et une valeur mximale de 250HV10

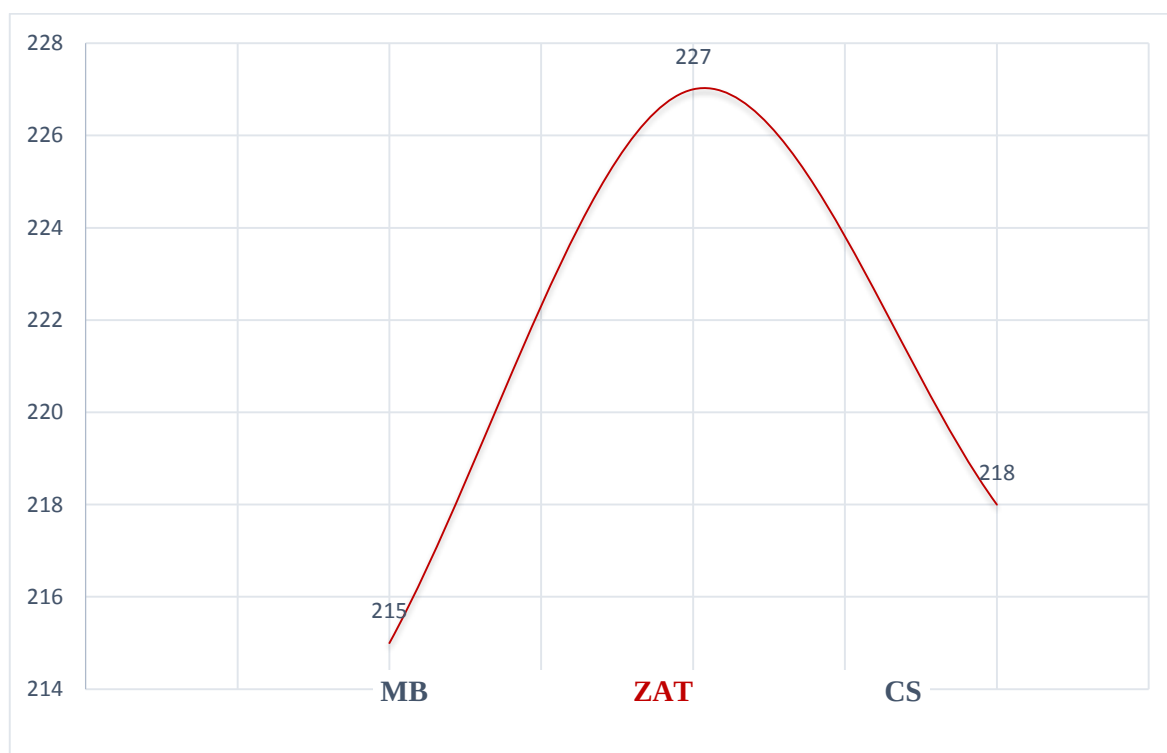


Figure V.6 : Variation de dureté entre les zones de soudage

V.4.2 variabilité de microdureté Vickers et estimation d'incertitude sur les profil réalisés :

l'opérateur fait toute une série de mesures. Le traitement des erreurs est statistique: moyenne, écart-type, incertitude type

Cette analyse statistique est faite par ce qu'on a peu d'indications sur les sources d'erreurs. Donc nous utilisons la **méthode de type A**

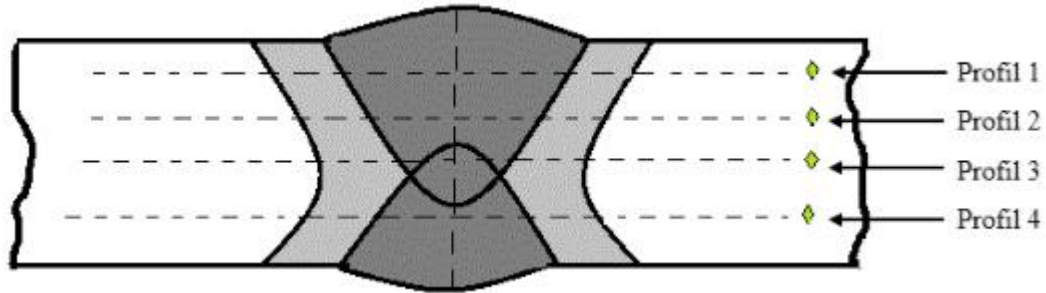


Figure V.7 : profil réalisée

Cas d'une série de ($n=40$) mesures indépendantes répétée sur quatre profils, l'incertitude type est obtenue par le calcul de l'écart type pour chaque profil avec :

Soit l'écart type empirique corrigé dit expérimental :

$$S_{exp} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}$$

Et $\bar{X}$ moyen arithmétique : $\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i$

Et l'incertitude type u telle que :

$$u = \frac{S_{exp}}{\sqrt{n}}$$

V.4.2.1 profil 1 :

moyen arithmétique	$\bar{X}$	258.245
l'écart type	Sexp	69.1
l'incertitude type	u	10.925



Figure V.8 : Courbe de variation des valeurs de microdureté Vickers sur les points de mesure du premier profil

V.4.2.2 profil 2 :

moyen arithmétique	$\bar{X}$	259.77
l'écart type	Sexp	41.6731
l'incertitude type	u	6.589

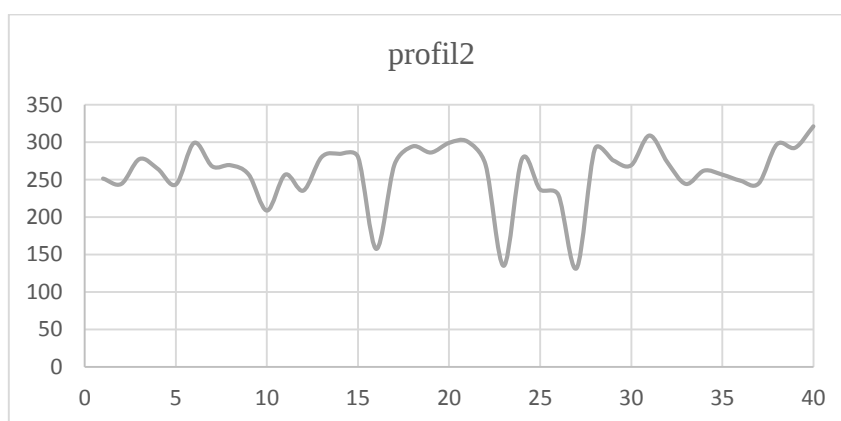


Figure V.9 : courbe de variation des valeurs de microdureté Vickers sur les points de mesure du deuxième profil

V.4.2.3 profil 3

moyen arithmétique	$\bar{X}$	273.147
l'écart type	Sexp	53.0495
l'incertitude type	u	8.3878

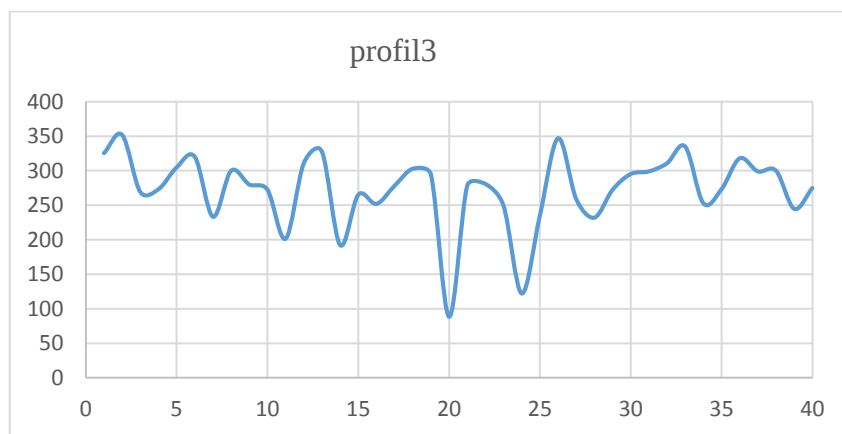


Figure V.10 : courbe de variation des valeur de microdureté Vickers sur le points de mesure du troisieme prfil

V.4.2.4 profil 4 :

moyen arithmétique	$\bar{X}$	255.217
l'écart type	Sexp	71.77
l'incertitude type	u	11.3478

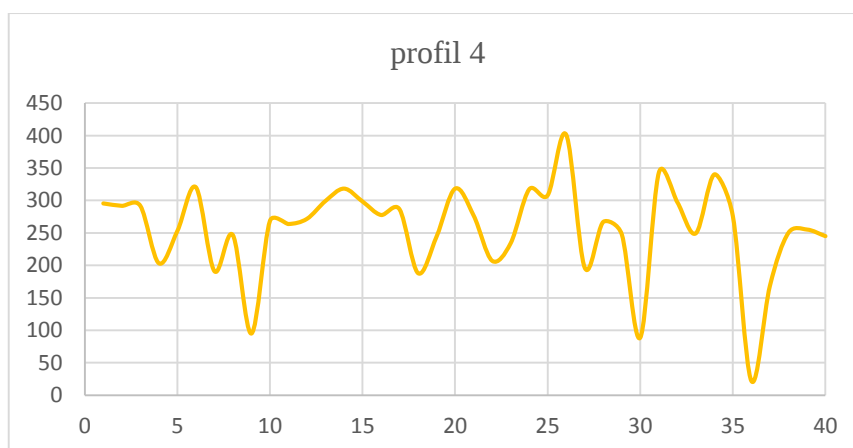


Figure V.11 : Courbe de variation des valeur de microdureté Vickers sur le points de mesure du quatrieme prfil

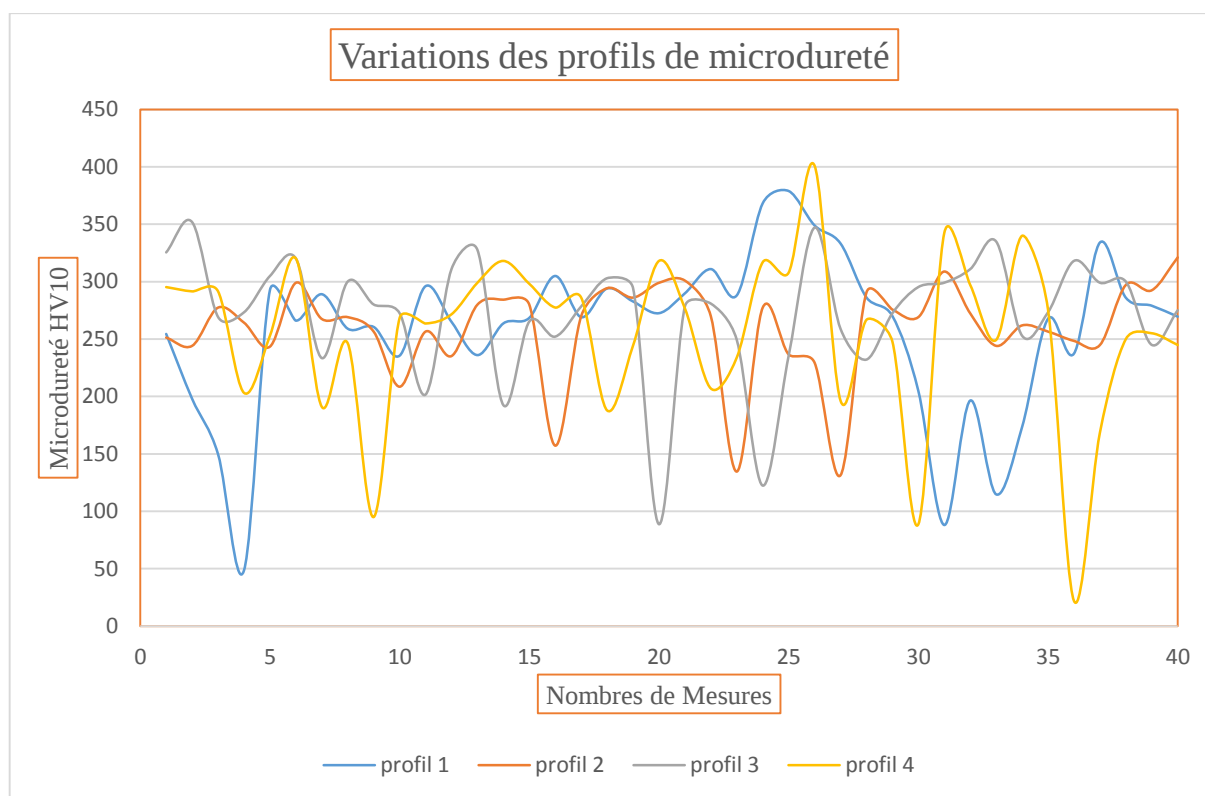


Figure V.12 : variation des profil de microdureté

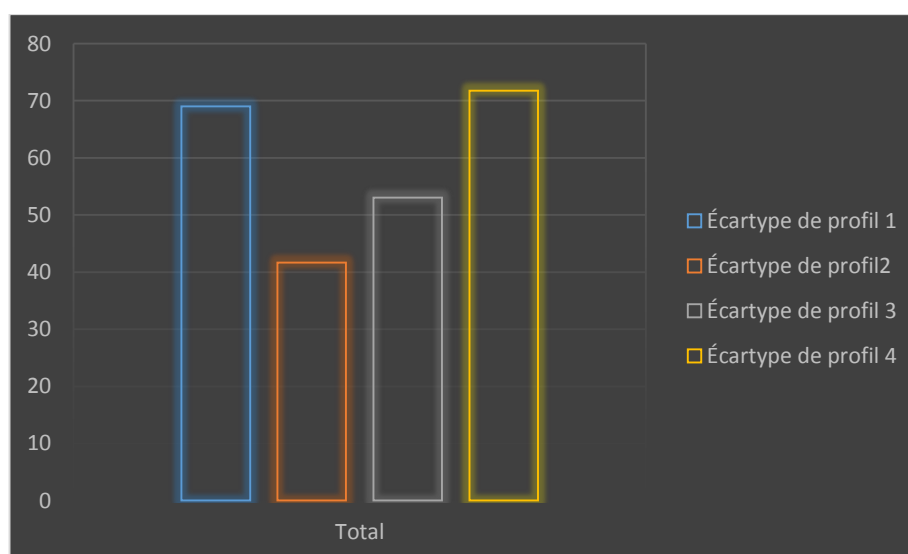


Figure V.13 : écart type de profils

Commentaire :

L'histogramme représentatif des écartype des quatre profils réalisé montre une homogénéité entre les deux profils latérale et une déminution de valeurs des deux autre ecart type de cœur (milieu) ce qui peut être expliquer par la géométrie du cordon de soudure qui à tandance de se focaliser vers le milieux et donc une fluctuation des valeurs mesurer faible



Figure V.14 : Macrographie des différents zones du cordon de soudure

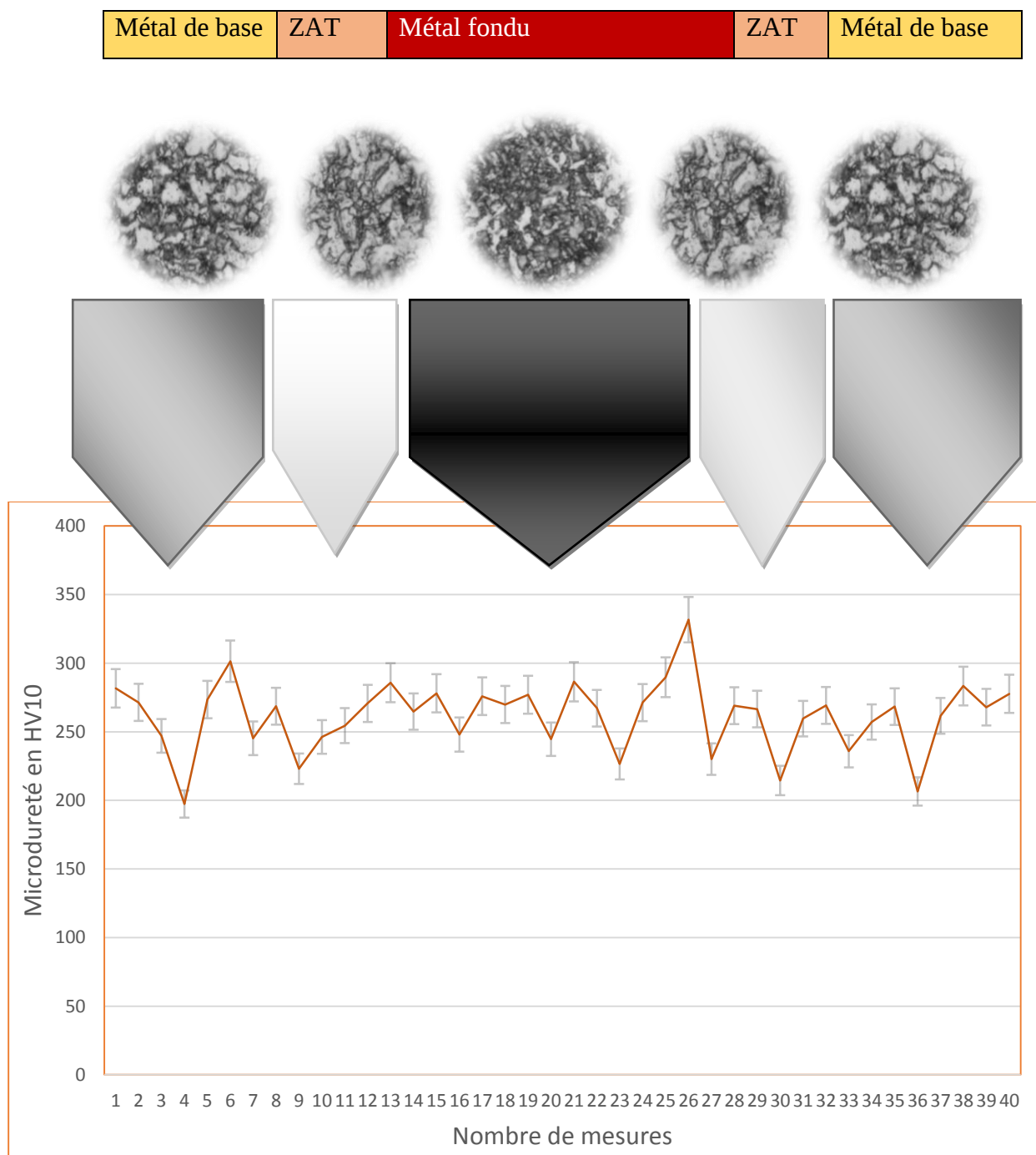


Figure V.15 : Variation moyenne des profils de microdureté Vickers sur le même échantillon

Interprétation des courbes :

- Le domaine de fluctuation des valeurs mesuré de microdureté Vickers au long de l'assemblage soudés reste toujours acceptables, ne présentent aucun anomalie elles sont conformes aux exigences de la norme API
- Une convergence des valeurs mesurées sur le métal de base et celle mesurées sur le cordon de soudure est remarquable ce qui confirme :
le degré d'homogénéité de l'électrode utiliser pour le soudage avec la nature du métal de base,
aussi la stabilité des paramètres notamment électrique lors de soudage.
- Des valeurs de mesure élevés sont présent dans la zone de passage cordon de soudure-métal de base connue par la zone affecté thermiquement, cette augmentation de la microdureté est dû au phénomène métallurgiques (contrainte thermiques localisés grossissement des grain suivie par une refoirdissement), les propriétés mécanique de cette zone elle plus fragile donc yant un risque d'être soumise à une rupture.

V.5. Relation entre dureté structure :

La microstructure de l'aciers a été étudiée à l'aide des microscopies optique et électronique à baliage (Annexe 5), Les surfaces observées sont polies jusqu'à 1 μm , nettoyées à l'acétone et séchées. La présence d'inclusions, non métalliques, peut être observée directement sur la surface polie. Pour visualiser les différentes phases de la microstructure, une attaque chimique ou électrochimique est effectuée. Les aciers au carbone ont été attaqués par le nital (4% solution de HNO_3 dans l'éthanol) pendant quelques secondes, dans le laboratoire de l'école. Les résultat obtenue son présent dans les figure suivants :

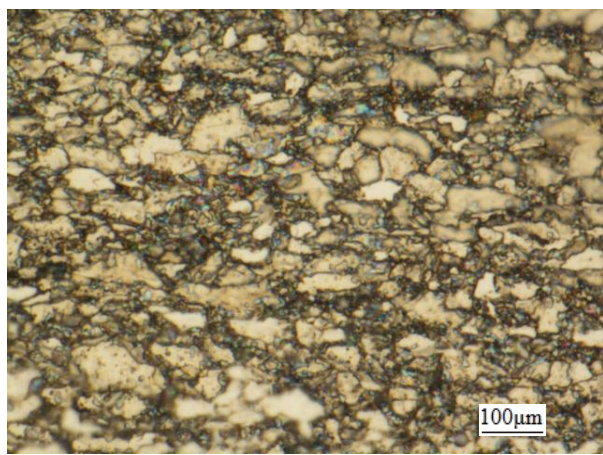
V.5.1. Microstructure du métal de base :

Figure V.16 : Microstructure par le microscope optique (X100), MB

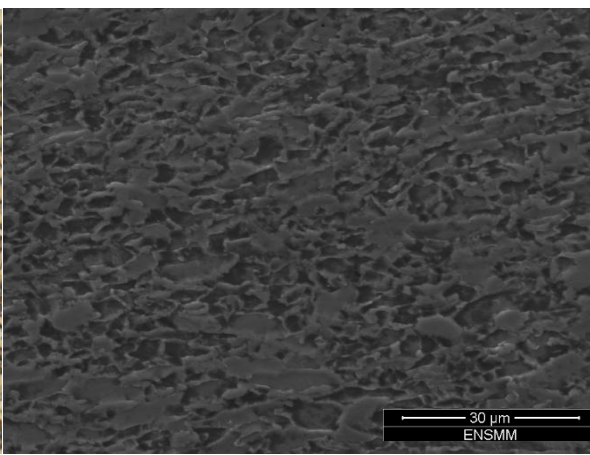


Figure V.17 : Microstructure par le microscope électronique à balayage, MB

La figure montre la microstructure du métal de base, qui est constituée de bainite à faible teneur en carbone $< 0.08\%$, connue aussi sous le nom de "ferrite aciculaire". Cette microstructure est obtenue par un refroidissement accéléré après un laminage à chaud de l'austénite non recristallisée. Le résultat de ce traitement est une matrice de ferrite aciculaire avec des traces de carbures ou (carbonitrides) et des îlots de martensite. Cette combinaison offre d'excellentes propriétés de résistance et de dureté.

Le durcissement se fait par quatre facteurs :

1. l'affinement de grain due au laminage à chaud contrôlé de l'austénite non recristallisée et par l'ajout des éléments de microalliage formant des précipités fins qui empêchent le grossissement du grain austénitique;
2. la densité élevée des dislocations dans les grains ferritiques due aussi au laminage à chaud des grains austénitiques;
3. les précipités fins de carbonitrides de niobium $Nb(C, N)$ dans la matrice de ferrite qui sont commandés par les teneurs de carbone, niobium et l'azote;
4. les petits îlots de martensite qui sont parfois discrets.

Les recherches faites sur cet acier prouvent que la fraction volumique de la ferrite aciculaire augmente avec l'augmentation de la quantité de déformation à chaud dans la région non recristallisée d'austénite parce que la ferrite aciculaire se forme au voisinage des sites favorables de nucléation tels que les dislocations dans les grains d'austénite. Cette déformation est insuffisante pour donner une microstructure entière de ferrite aciculaire ; Par conséquent une addition des éléments affinant tel que le Nb s'ajoutant à la trempabilité doivent être prescrites car il s'est avérée, qu'une petite augmentation en niobium de 0.045 à 0.075 % donne une microstructure plus homogène avec la meilleure résilience.

Finalement, cette microstructure est nécessaire pour l'acier API 5L de catégorie X-70 qui est satisfaisante et garantit les propriétés mécaniques demandées ($\sigma_e > 485$ MPa, $R_m > 570$ MPa) du métal de base, la ZAT et le métal fondu

V.5.2. Microstructure de la zone affecté thermiquement :

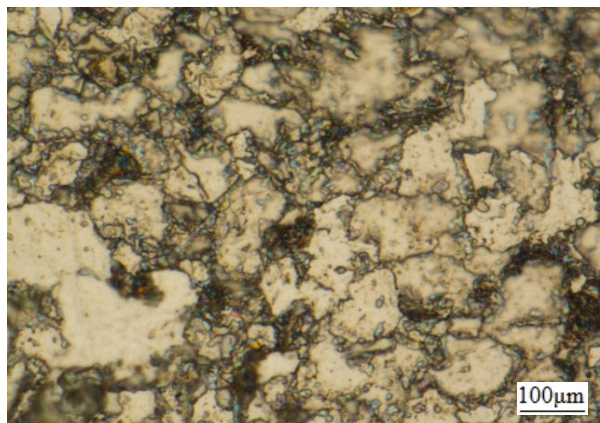


Figure V.18 : Microstructure par le microscope optique (X100) ZAT

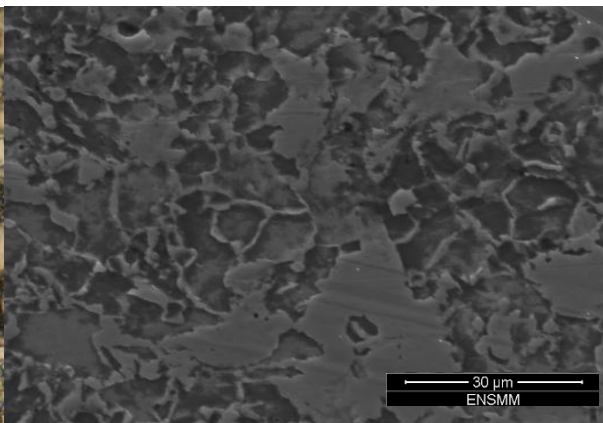


Figure V.19 : Microstructure par le microscope électronique à balayage, ZAT

Dans la zone à gros grain de la ZAT, il n'est pas possible d'obtenir la même microstructure optimale comme celle obtenue sur le métal de base parce que les températures sont beaucoup plus hautes dans cette région par l'effet des cycles thermiques de soudage. Lors du chauffage à haute température (> 900 °C), les précipités de Nb(C, N) qui affinent les grains d'austénite se dissolvent et cette dissolution permet et favorise le grossissement du grain austénitique. Les précipités se dissolvent complètement parce que l'énergie linéaire de soudage est grande (20.72 kJ/cm) et cela mène à une homogénéisation de l'austénite [4].

Les contraintes de traction et de compression appliquées au joint soudé par l'effet du soudage accélèrent la cinétique de grossissement des précipités durant le refroidissement contrairement au cas sans contraintes. C'était dû à la plus grande diffusivité des atomes dissous accomplis par l'augmentation de la densité de dislocations sous la déformation. En plus, la température de la transformation de phase $\gamma \rightarrow \alpha$ diminue avec l'augmentation de la température de réchauffage; ces deux mécanismes mènent à une microstructure mixte de bainite granulaire et de ferrite polygonale à gros grains avec la dispersion de petites particules de cémentite.

V.5.3. Microstructure du métal fondu :

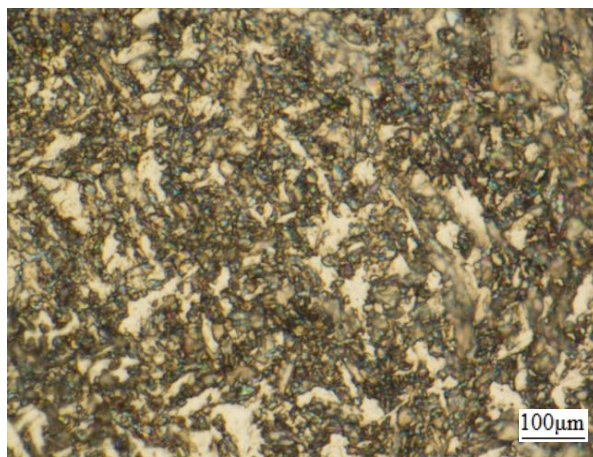


Figure V.20 : Microstructure par le microscope optique (X100), Métal fondu

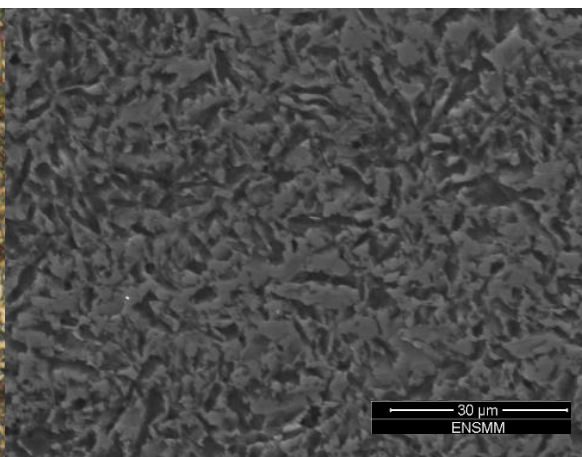


Figure V.21 : Microstructure par le microscope électronique à balayage, Métal

On rappelle d'abord que la composition chimique du métal fondu est différente de celle du métal de base, donc une microstructure différente. Cette composition résulte du mélange du métal déposé par le produit de soudage avec le métal de base. La microstructure de chaque point du métal fondu (MF) dépend de la vitesse de refroidissement et la température maximale atteinte. Le métal fondu avec deux passes intérieur et extérieur est habituellement considéré comme une seule région où la microstructure se développe pendant que la soudure se refroidit de la phase liquide à la température ambiante; on l'appelle zone brute de solidification, cette zone présente une structure mixte de ferrite aciculaire, bainite granulaire et de faible pourcentage en martensite et austénite résiduelle.

L'élément qui favorise la formation de la ferrite aciculaire est le molybdène. On voit un manque de ferrite aciculaire à cause du manque des inclusions et des éléments de microalliage (Mn, Mo et Nb) dans le métal fondu indispensables pour sa formation, et il apparaît à sa place la bainite granulaire. Les inclusions jouent le rôle de germes pré-existants pour la formation de la ferrite aciculaire; tandis que, l'addition contrôlée d'éléments de microalliage et l'augmentation de la vitesse de refroidissement ne peuvent avoir d'effet sur la vitesse de germination de la ferrite aciculaire mais seulement sur sa vitesse de croissance

V.6. Conclusion :

Sur les images, la ferrite apparaît au microscope optique comme une phase blanche, la perlite est plus foncée. Au microscope électronique à balayage (MEB), les grains de ferrite sont foncés et la perlite est claire. Les données disponibles sur l'acier X70 dans les publications récentes montrent qu'il existe un large spectre d'aciers répondant aux critères de composition prévus pour cette désignation. Il convient donc d'identifier plus en détail les paramètres caractérisant l'acier dont nous avons obtenus les échantillons. Une section dans le plan perpendiculaire à l'axe du tube, nous permet de mesurer la microdureté après l'observation la microstructure qui se compose essentiellement de grains de ferrite polygonale (blanc) et de perlite (en foncé) organisés en bandes. Ce type de microstructure est engendrée par la ségrégation des éléments Mn et P lors du laminage, conditionne la dureté elle très courante pour les aciers X70.

CONCLUSION GENERALE

Ce mémoire représente une contribution modeste dans le domaine des méthodes de contrôle qualité, ce dernier est un domaine complexe et il fait appel à des notions pluridisciplinaires (statistiques – mathématiques, physique du produit et du procédé, la science de la mesure, les méthodes de contrôle et de détection des défauts, la classification etc.).

L'étude du processus de fabrication a été réalisée par un suivi des produits de la matière première jusqu'au produit fini, les points de contrôle ont été identifiés et les normes de contrôle tel que l'API 5L ont été appliquées.

Les méthodes d'échantillonnage pour la mesure ont été appliquées, les méthodes de préparation des échantillons et la qualification des essais/mesures ont été étudiées. Tous les modes opératoires sont encadrés par les exigences de norme API 5L.

Une approche mathématique pour formaliser les différentes relations qualifiant la qualité du produit et/ou du processus considéré, la règle des 5M a été étudiée et appliquée : La variabilité des différents paramètres a été aussi étudiée.

Les principales caractéristiques du cordon de soudure ont été étudiées dans les différentes zones (MB, ZAT, Métal d'apport), une caractérisation métallurgique et mécanique a été effectuée, les aspects théoriques ont été ainsi vérifiées.

Une approche de calcul des incertitudes en dureté a été introduite à la demande du laboratoire, cet aspect est important car le laboratoire est en cours d'accréditation ISO CEI 17025, les aspects liés aux calculs des erreurs de mesure deviennent une exigence pour la déclaration de la conformité d'un produit.

Mon séjour au sein du département contrôle qualité de ALFAPIPE Annaba m'a permis de combiner les connaissances théoriques acquises durant mon cursus, la méthodologie de la recherche scientifique et l'application sur le terrain pour la réalisation d'un tube conforme aux exigences internationales.

D'autres aspects R&D, tel que le monitoring et l'étude de la variabilité instantanée des paramètres électriques (U, I et R) et leurs influences sur la qualité du cordon de soudure ont été évoqués, ils feront probablement l'objet d'un amendement de la prochaine version (2017) de la norme API 5L. Vu la complexité du projet et le temps allouée pour l'élaboration de ce mémoire, l'étude détaillée n'a pas été effectuée, elle fera l'objet des perspectives.

Références bibliographiques :

Chapitre I :

- [1] Documents ALFAPIPE.
- [2] Précis Métallurgie J.Barralis GMaeder.
- [3] les aciers à haut limite d'élasticité, Guide AFGC octobre 2012.
- [4] Marc GRUMBACH, Technique de l'ingénieur, « Aciers microalliés », M4 525.

Chapitre II :

- [1] Article : étude de qualité de soudure SIDER -Lemboub.S-
- [2] Document ALFAPIPE
- [3] ADAMS (C.M.). – Weld, Welding Journal, vol. 37, no 5 (1958).

Chapitre III :

- [1] document laboratoire métrologie métallurgie –ALFAPIPE Annaba-
- [2] aide-mémoire Procédés de soudage -Klas Weman- Edition DUNOD

Chapitre IV :

- [1] Cattan, M., N. Idrissi et P. Knockaert. Maîtriser les processus de l'entreprise. Edition d'organisation, 2006.
- [2] norme NF X 50-120. "Qualité, vocabulaire in "gérer et assurer la qualité"-tome 1. Edition AFNOR-paris, 1992.
- [3] Chove, J. la dernière avancée de l'école française de la qualité. Dans « gérer et assurer la qualité ». tome1. 1992
- [4], Dominique, H. Apport des méthodologies d'analyses systémiques dans la préparation à la certification ISO90001 :2000 d'une PMI. Diplôme post grade en informatique et organisation. Université de LAUSANNE, France, 2003.
- [5] Norme NF EN ISO 8402. Management de la Qualité et assurance de la Qualité : Vocabulaire. Edition ISO, 1995.
- [6]NF EN ISO9000 Version 2000. *Systèmes de management de la qualité, Principes essentiels et vocabulaire*. Edition ISO, 2000.
- [7] Fleurquin, R. Proposition d'une démarche qualité logicielle pour les PME. Un modèle d'évaluation de la qualité et des critères et conseils permettant sa mise en oeuvre à travers les

outils et les méthodes. Thèse de doctorat de l'Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, France, 1996.

[9] Statistical Process Control (John S. Oakland) Fifth Edition

[8] MAITRISE STATISTIQUE DES PROCEDES, GENERALITES, A. LAMURE

[10] Villalonga, C. L'audit qualité interne. ISBN 2 10 005196 2. Edition Dunod, Paris 2003.

[11] AM. CHAUVEL - Méthodes et outils pour résoudre un problème. 30 outils pour améliorer la qualité de votre organisation ; Paris : Dunod 1996

[12] Norme ISO 8402 « Management de la qualité et assurances de la qualité-Vocabulaire »
AFNOR 1995.

[13] WOMACK, J., JONES, D. Système Lean penser l'entreprise au plus juste. Paris, Pearson, 2009

[14] thèse (Contribution méthodologique à la maîtrise conjointe de la qualité d'un produit et de ses processus de production par une modélisation des concepts qualité) ,- Salah DEEB- Ecole Supérieure des Sciences et Technologies de l'Ingénieur de Nancy

[15] Document technique - ALFAPIPE-

[16] livre métallurgie bibliothèque de l'école

Annexe [17] « Soudage de canalisations et installations connexes », norme API 1104, IXXe édition, 1999.

Chapitre V :

[1] Une norme pour la détermination des incertitudes de mesures : NF ENV 13005

GUIDE POUR L'EXPRESSION DE L'INCERTITUDE DE MESURE (GUM)

[2] The Estimation of Uncertainties in Hardness Measurements -W GABAUER-

[3] Aide-mémoire statistique et probabilités pour l'ingénieur, Renée Veyseyre 3^{ème} édition,
DUNOD

[4] Thèse Magistère, Evolution de la microstructure et des propriétés mécanique de l'acier HSLA X70 lors de réparation par soudage –NOREDDIN Mustapha- ENPA

Annexe1 :

Présentation du Centre de Recherche en Technologie Industriel (Chéraga-Alger):

Relevant du Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique, le Centre de Recherche en Technologies Industrielles (CRTI), créé par le décret exécutif n° 15-109 du 3 mai 2015 modifiant le décret exécutif n° 92-280 du 6 juillet 1992 portant création du Centre de Recherche Scientifique et Technique en Soudage et Contrôle (CSC), est un Établissement Public à caractère Scientifique et Technologique (EPST). LE CRTI, ex-CSC, compte un potentiel humain de 750 fonctionnaires dont 300 chercheurs permanents, 200 appartenant au personnel technique et 150 experts et ingénieurs relevant de la filiale CSC Expertise Spa. Par ailleurs, le centre dispose de plusieurs structures de recherche et de valorisation à travers le territoire national. Avant d'acquérir le statut d'EPST, le centre est passé par différentes phases d'évolution, en partant de la création du laboratoire de soudage et de contrôle non destructif (LSCND) en 1985 jusqu'à la création d'un centre de recherche de dimension nationale en 1992. Le CRTI, ex-CSC, a reçu pour mission générale de mettre en œuvre les programmes de recherche nécessaires au développement des technologies de soudage et de contrôle destructif et non destructif. Près de trente ans plus tard, cette mission conserve toute son actualité. Cependant, au fil des décennies, le contenu des missions du centre a évolué et s'est enrichi ce qui a nécessité la redéfinition des missions et le changement de la dénomination du centre. A ce titre, le centre est désormais dénommé Centre de Recherche en Technologies Industrielles (CRTI)

Activité de recherche :

- Sidérurgie et Métallurgie
- Contrôle Non Destructif (CND)
- Corrosion
- Technologie Industrielle
- Soudage et techniques connexes

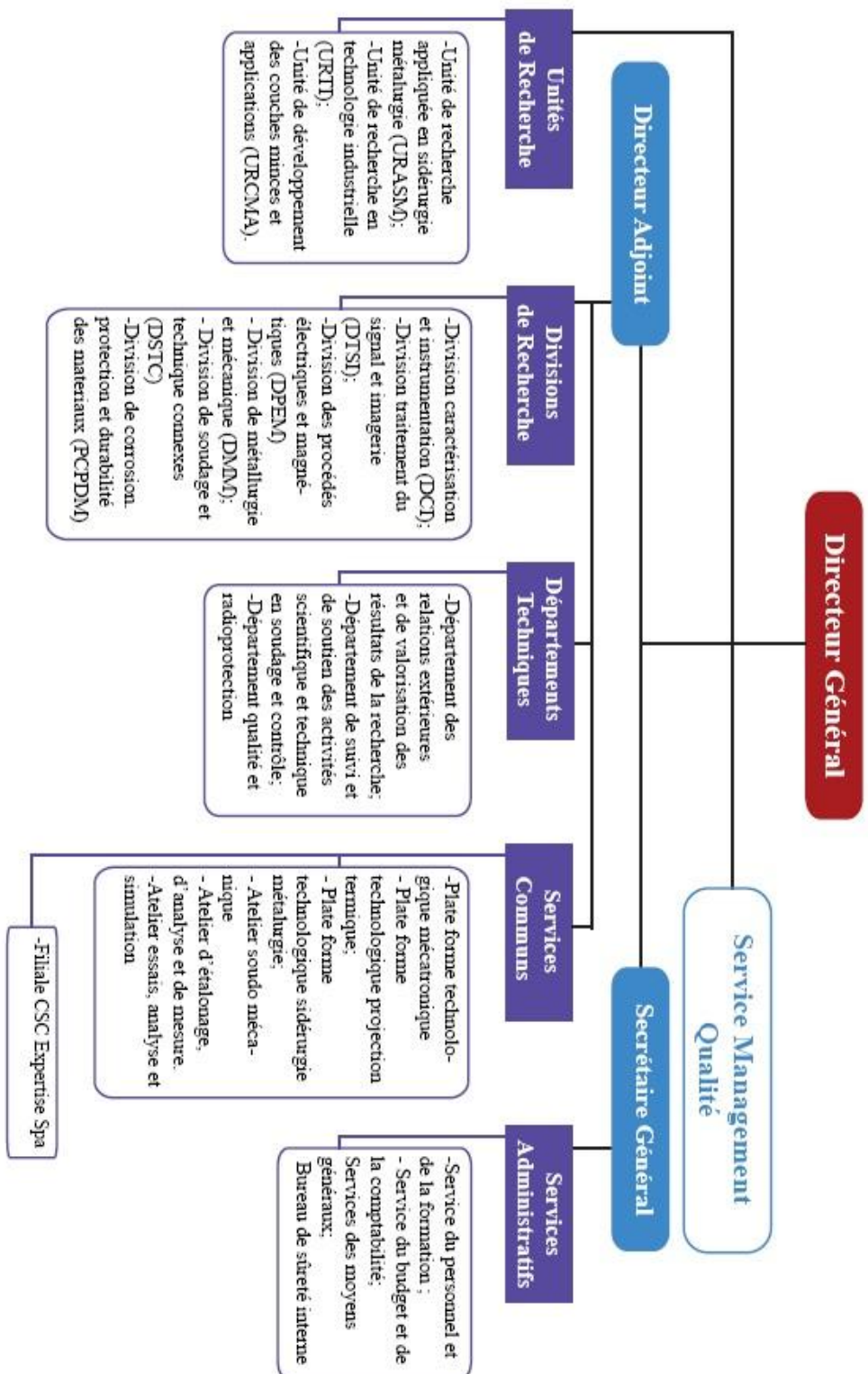
Unités de recherches

- Unité de recherche en matériaux avancés URMA
- Unité de recherche appliquée en sidérurgie et métallurgie URASM
- Unité de développement des couches minces et applications UDCMA

Atelier

- Atelier soudo-mécanique – CRTI / Chéraga - Alger
- Atelier d'étalonnage, d'analyse et de mesure – CRTI / Chéraga - Alger
- Atelier essais, analyse et simulation - URASM / El-Hadjar - Annaba
- Atelier essai, caractérisations et mesure - URMA / Sidi Ammar - Annaba

Organigramme du centre de recherche :



Référence : site web du centre <http://www.crti.dz/>

Annexe2 :

Présentation de l'entreprise

ALFAPIPE ex ALFATUS est une entreprise spécialisée dans la fabrication des tubes pour canalisations d'hydrocarbures et d'hydrauliques. Elle dispose d'un système management qualité assurant la conformité du produit selon les normes internationales AP1 et ISO9001 depuis 2000.

TUBERIE ANNABA

Située à 15 Km d'Annaba ALFAPIPE est spécialisée dans la fabrication de tubes soudés en spirale destinés pour l'industrie des hydrocarbures (gaz et pétrole) et leurs revêtements (extérieur et intérieur).

Son savoir-faire et son aptitude à répondre aux besoins diversifiés des utilisateurs, est entré dans le concert des grands fabricants de tubes.

C'est aujourd'hui :

- Une prestation de qualité : un tube revêtu livré sur site pour éviter les aléas de manutention et de stockage intermédiaire ;
- Un partenariat actif avec SONATRACH et les compagnies étrangères associées (Thyssen crupp ; Arcelor, Lincoln...etc.).
- Une ferme volonté de conforter sa place de leader de production de tubes par la recherche de nouvelles formes d'association et par le renforcement de son processus de modernisation

Le tube soudé en spirale est obtenu à partir d'un formage à froid d'une bobine d'acier, conformément aux normes API 5L et NFA 49150.

La soudure des bords est faite en automatique à l'arc émergé sous flux, l'une à l'intérieur, l'autre à l'extérieur

Référence : Documents ALFAPIPE

Annexe 4 :

Construction de diagramme cause-effet :

1. Diagramme cause-effet ou diagramme d'Ishikawa

1.1. Objectif : Travail de groupe consistant à classer par familles et sous-familles, de façon claire, toutes les causes identifiées d'un effet observé. Le diagramme se présente sous forme d'arborescence en arête de poisson.

1.2. Déroulement : Suite à un brainstorming où les causes sont mises en évidence :

1 - Définir les familles de causes autour des 5M :

Main d'œuvre : Qualification, absentéisme, formation, motivation

Matériel : Machines, outillage, capacité...

Matière : Matière première, documents, données informatiques...

Méthode : Règles de travail, procédures, protocoles, façons de faire...

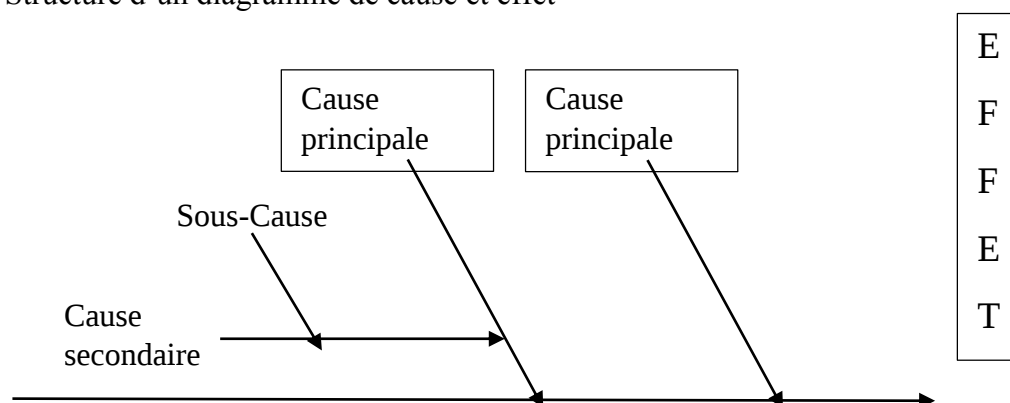
Milieu : Infrastructure, espace, bruits, éclairage, température...

2 - Affecter chacune des causes du problème à l'une des familles :

Si les causes sont nombreuses à l'intérieur d'une famille, définir des sous-familles ou sous causes, ex : dans la famille Formation (formation initiale, formation professionnelle...)

3 - On peut rechercher des causes plus fines ; il s'agit alors de « descendre » dans le détail de chacune des causes principales.

4 - Structure d'un diagramme de cause et effet



S'ensuit l'utilisation d'autres outils qualité pour résoudre le problème [11],[12],[13].

2. Brainstorming ou « remue-méninges »

Objectif : Séance de travail permettant de produire, en groupe, un maximum d'idées, dans un minimum de temps sur un thème donné. Cette technique est utilisée dans la plupart des étapes de la résolution de problèmes pour :

Identifier le problème,

Rechercher ses causes,

Proposer des solutions à ce problème.

Le BRAINSTORMING doit être organisé par un animateur qui doit : Annoncer le but recherché, disposer d'un support pour noter les suggestions qui resteront visibles au groupe de réflexion, animer le groupe en favorisant la production d'idées. Limiter le groupe à 10 personnes [11].

Ne pas évincer une idée par un a priori.

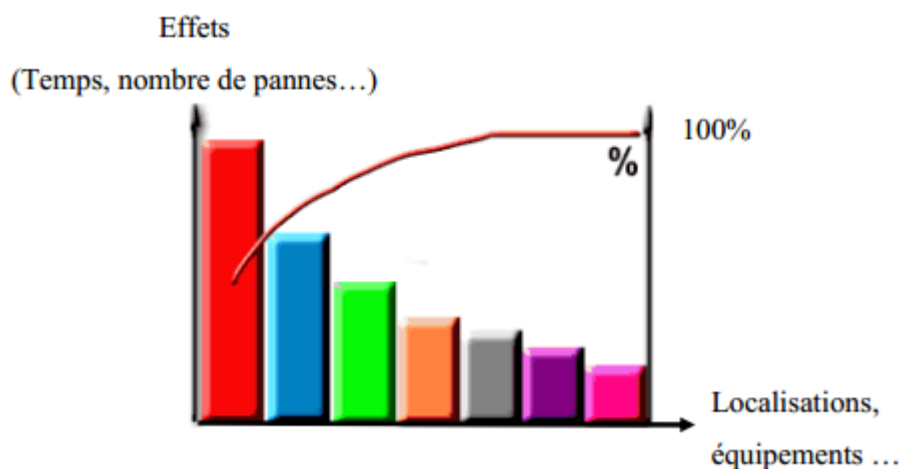
Déroulement : Ecrire, afficher et expliquer le thème à développer. Le problème est posé sous forme d'une question.

1. La production d'idées : Ecrire les différentes idées exprimées par le groupe sur le sujet, les numéroter, en souligner les mots clés.

2. L'exploitation des idées produites : Regrouper les idées de même nature, les classer par thème, reformuler les idées peu claires et rejeter les idées hors sujet.

3 Diagramme de Pareto :

Le diagramme de Pareto est un moyen simple pour trier les problèmes. Il a été inventé en 1875 par Vilfredo Pareto, sociologue et économiste italien, en observant que 80% des effets sont dus à 20% des causes. Le diagramme de Pareto est un histogramme dont les colonnes sont classées de la plus importante à la moins importante en partant de la gauche. Une ligne de cumul indique l'importance relative des colonnes. Les premières colonnes correspondent aux « têtes de Pareto »



exemple de diagramme de Pareto

Références : [11][12][13].

Annexe 5 :

Le MEB :

1. Principe de fonctionnement :

Contrairement au MET et au microscope optique, l'image n'est pas formée par une lentille objective. L'image est formée de manière séquentielle en balayant la surface de l'échantillon par un faisceau d'électrons. Le MEB fournit des images de la surface en relation avec le mode de diffusion des électrons par l'échantillon [28].

Le nombre d'électrons secondaires et rétrodiffusés émis varie en fonction du point d'impact du faisceau d'électrons sur la surface. Ces électrons sont détectés dans des détecteurs. Une image est obtenue en relation avec l'intensité du courant électrique produit en chaque point de la surface. La topographie de l'échantillon est ainsi obtenue [28].



Figure : MEB à émission de champ.

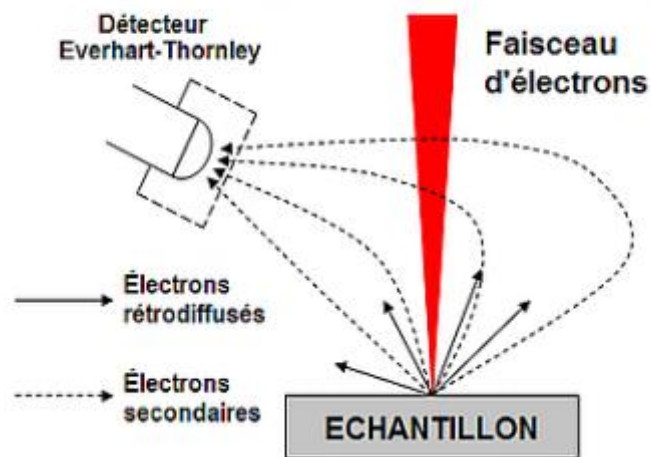
2. Diffusion des électrons :

2.1.Électron secondaire :

La détection de ces électrons fournit une information sur la topographie de l'échantillon sur une profondeur de 10 nm. L'analyse de ces électrons permet d'obtenir une image caractéristique de la surface. Ces électrons représentent un bon outil pour l'observation des contours, de la morphologie de l'échantillon [42].

2.2. Électron rétrodiffusé :

Plus le numéro atomique de l'atome est élevé, plus le signal est intense et plus la zone de l'image est claire. C'est le contraste de phase. L'image obtenue est donc fonction de la composition chimique de l'échantillon [42].



3. Émission d'un photon X :

L'étude des photons X permet une analyse quantitative de la composition chimique de l'échantillon.

Référence : MEB Article [17]